



Universidade de Brasília

**Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação**

Estudo Comparativo de Consumo de Energia Elétrica de Redes Locais BaseT e Redes Locais Ópticas Passivas

Rodrigo Otávio Ribeiro Hagstrom

Dissertação apresentada como requisito parcial para conclusão do
Mestrado Profissional em Computação Aplicada

Orientador
Prof. Dr. André Costa Drummond

Brasília
2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

He	<p>Hagstrom, Rodrigo Otávio Ribeiro</p> <p>Estudo Comparativo de Consumo de Energia Elétrica de Redes Locais BaseT e Redes Locais Ópticas Passivas / Rodrigo Otávio Ribeiro Hagstrom; orientador André Costa Drummond. - Brasília, 2019.</p> <p>96 p.</p> <p>Tese (Doutorado - Mestrado Profissional em Computação Aplicada) -- Universidade de Brasília, 2019.</p> <p>1. Redes Ópticas Passivas. 2. Redes Cabeamento Metálico. 3. Economia de Energia Elétrica. 4. Avaliação de Desempenho. 5. Custo de Propriedade. I. Drummond, André Costa, orient. II. Título.</p>
----	---



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Estudo Comparativo de Consumo de Energia Elétrica
de Redes Locais BaseT e Redes Locais Ópticas
Passivas**

Rodrigo Otávio Ribeiro Hagstrom

Dissertação apresentada como requisito parcial para conclusão do
Mestrado Profissional em Computação Aplicada

Prof. Dr. André Costa Drummond (Orientador)
CIC/UnB

Prof. Dr. Gustavo Bittencourt Figueiredo Profa. Dra. Priscila América Solís Mendez Barreto
DCC/Universidade Federal da Bahia CIC/Universidade de Brasília

Profa. Dra. Aletéia Patrícia Favacho de Araújo Barreto
Coordenadora do Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada

Brasília, 28 de janeiro de 2019

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha pequenina e amada filha, Vitória, e à minha esposa, Viviane.

Agradecimentos

Alguns agradecimentos não poderiam deixar de ser feitos após a conclusão deste trabalho.

Em minha crença, cada um daqueles que me auxiliaram são imagem e instrumento do Criador das leis da natureza, ao qual expresso inicialmente minha gratidão.

Alguns nomes cito à seguir, pedindo perdão àqueles que eventualmente colaboraram com o trabalho e que não menciono.

André Drummond, meu orientador, sempre presente, ao qual é devido, sem dúvida, qualquer elogio quanto aos acertos da pesquisa.

Priscila Barreto, professora que foi grande responsável pela concepção da pesquisa, bem como da metodologia utilizada.

Gabriel Ferreira, colega que dedicou-me preciosas horas de seu tempo repartindo seus conhecimentos sobre simuladores de redes.

Fabício Oliveira e Deborah Oliveira, amigos que auxiliaram na fase final do trabalho.

Heitor Faria, Marcito Campos, Marco Reis, Rodrigo Alves, Fábio Leal, Tarcízio Vieira Neto e Fernando Borges, colegas do Programa de Mestrado Profissional em Computação Aplicada (PPCA). Estes auxiliaram, ou buscaram auxiliar, em diversas atividades da pesquisa.

Aos demais colegas do PPCA meu agradecimento pelo companheirismo e apoio nas diversas disciplinas e atividades.

Meu muito obrigado a todos!

Resumo

A dissertação ora apresentada consiste trabalho no qual se busca realizar avaliação de desempenho baseada na métrica de consumo de energia elétrica. A avaliação objetiva comparar o consumo energético de equipamentos de redes baseadas em transmissão por cabeamento metálico em oposição a equipamentos de redes ópticas passivas, verificando se tal substituição é capaz de gerar economia de energia suficiente para que a troca de tecnologia seja economicamente vantajosa. Neste contexto, busca-se inicialmente realizar a construção de um modelo analítico para analisar o consumo de energia de equipamentos empregados nos modelos de redes comparados, considerando nos equipamentos suas capacidades quanto ao manejo do consumo de energia elétrica, com destaque para a adoção de estados de baixo consumo de energia em situação de ausência temporária de tráfego de dados. Em seguida, a proposta se orienta ao emprego de simulações como método comprobatório dos resultados calculados por meio de modelos analíticos. Com a compilação dos resultados, verifica-se a validade da hipótese: *a troca de tecnologia BaseT por POL não é inequivocamente vantajosa em termos energéticos*. Os resultados obtidos não permitiram a negação da hipótese, indicando que uma eventual vantagem quanto à economia de energia elétrica de uma rede óptica está ligada às características inerentes dos equipamentos com os quais se propõe substituir os equipamentos de uma rede já instalada, bem como a exploração de capacidade de manejo de energia e reengenharia da rede de tecnologia BaseT empregada.

Palavras-chave: Redes Ópticas Passivas, Redes Cabeamento Metálico, Economia de Energia Elétrica, Avaliação de Desempenho, Custo de Propriedade

Abstract

The dissertation presented here consists of work that seeks to perform performance evaluation based on the metric of electric energy consumption. The objective of the evaluation is to compare the energy consumption of transmission-based networks with metallic wiring in opposition to passive optical network equipment, verifying whether such substitution is capable of generating sufficient energy savings so that the exchange of technology is economically advantageous. In this context, it is initially intended to construct an analytical model to analyze the energy consumption of equipment used in the comparative network models, considering in the equipments their capacities regarding the management of electric energy consumption, with emphasis on the adoption of states of low power consumption in a situation of temporary absence of data traffic. Then, considering the methodology of performance evaluation established by the academy, the proposal is oriented to the use of simulations as a method to prove the results calculated by means of analytical models. With the compilation of the results, the validity of the hypothesis is verified: *the replacement of BaseT technology by POL is not unequivocally advantageous in energy terms*. The results obtained did not allow to deny the hypothesis, indicating that a possible advantage over the electrical energy savings of an optical network is related to the inherent characteristics of the equipment with which it is proposed to replace the equipment of an already installed network, as well as the exploitation capacity management and reengineering of the BaseT technology network employed.

Keywords: Passive Optical Networks, Metallic Wired Networks, Electrical Energy Savings, Performance Evaluation, Cost of Ownership

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Proposta do Trabalho	2
1.2	Contribuições	5
2	Conceitos Básicos e Revisão da Literatura	6
2.1	Redes BaseT, Redes Ópticas e POLs	6
2.1.1	Redes <i>BaseT</i>	6
2.1.2	Redes Ópticas Passivas - PON - e Redes Locais Ópticas Passivas - POL	7
2.2	Consumo de Energia em Equipamentos de Transmissão de Dados	9
2.2.1	Princípios e Estratégias Gerais em Estudos de Consumo e Economia de Energia em Redes de Transmissão de Dados	10
2.2.2	Estudos de Energia e Eficiência Energética em Redes com Cabea- mento Metálico	16
2.2.3	Estudos de Energia e Eficiência Energética em Redes Ópticas Passivas	21
2.2.4	Simuladores em Estudos de Energia em Redes de Transmissão de Dados	26
3	Metodologia de Avaliação de Desempenho	28
4	Resultados	39
4.1	Resultados Obtidos por Modelos Analíticos	40
4.2	Resultados Obtidos com Simulações	45
4.2.1	Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação UDP echo	46
4.2.2	Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação VoIP	49
4.2.3	Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação HTTP	52
4.3	Considerações adicionais sobre os resultados obtidos	56
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos Futuros	61

Referências	63
Apêndice	69
A Exemplo de Código Principal de Simulação de Rede Metálica - Aplicação HTTP	70
B Códigos Simulador XG-PON Alterados para Obtenção de Simulação G-PON e de Coleta de Valores de Variáveis para Estatísticas de Tráfego e de Consumo de Energia Elétrica	78
B.1 Alterações Simulador XG-PON para Obtenção de Simulação G-PON	78
B.1.1 Alteração da Velocidade de Transmissão	79
B.1.2 Alteração do Tamanho do Pacote	80
B.1.3 Alteração da Necessidade de Verificação do Tamanho do Pacote ser Divisível por 4	80
B.2 Coleta de Valores de Variáveis para Estatísticas de Tráfego e de Consumo de Energia Elétrica	81
C Exemplo de Código Principal de Simulação de Rede POL - Aplicação UDP echo	86

Lista de Figuras

2.1 "Rede Óptica Ativa", baseada em Figura de Hirafuji [1]	8
2.2 Rede Óptica Passiva, baseada em Figura de Hirafuji [1]	9
2.3 Transição de estados de uma ONU, baseada em Figura de Lee and Chen [2]	12
2.4 Fluxo de mudança de estados no padrão 802.3az, baseado em Figura de Pimentel [3]	18
2.5 Situações de uso simultâneo ou não de transmissor e receptor entre dois equipamentos quaisquer, baseado em Figura de Pimentel [3], com adaptações. A seta em vermelho representa situação de atividade.	20
2.6 Consumo de energia durante fluxo de estados de baixo consumo em <i>Cyclic Sleep Mode</i> e <i>Doze Mode</i> . Figura extraída de Hirafuji [1]. <i>Aware</i> , <i>Listen</i> e <i>Sleep</i> são estados possíveis para a porta da ONU. P representa a potência e t o tempo. T representa o tempo em um determinado estado ou período de transição. Sendo Tx o componente transmissor e Rx o componente receptor, encontra-se em <i>Aware</i> : Tx ativo e Rx ativo, em <i>Listen</i> : Tx inativo e Rx ativo e em <i>Sleep</i> : Tx inativo e Rx inativo	24
2.7 Consumo de energia durante fluxo de estados de baixo consumo em <i>Watchfull Sleep Mode</i> . Extraída de Hirafuji [1], com adaptações. <i>Aware</i> , <i>Listen</i> e <i>Sleep</i> são estados possíveis para a porta óptica da ONU. P representa a potência e t o tempo. T representa o tempo de permanência em um determinado estado ou período de transição. Sendo Tx o componente transmissor e Rx o componente receptor, encontra-se em <i>Aware</i> : Tx ativo e Rx ativo, em <i>Listen</i> : Tx inativo e Rx ativo e em <i>Sleep</i> : Tx inativo e Rx inativo. O <i>Watchfull Sleep Mode</i> utiliza o estado <i>Sleep</i> em alternância com o estado <i>Listen</i>	24
3.1 Topologia das redes BaseT	32
3.2 Topologia das redes POL	32

4.1	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL.	40
4.2	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.	42
4.3	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL. Após certo volume de usuários atendidos as redes BaseT podem se tornar mais vantajosas quanto ao consumo de energia elétrica.	44
4.4	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego UDP echo em redes BaseT e redes POL.	47
4.5	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego UDP echo em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.	49
4.6	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego VoIP em redes BaseT e redes POL.	50
4.7	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego VoIP em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.	53
4.8	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego HTTP em redes BaseT e redes POL.	55
4.9	Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego HTTP em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.	56

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros rede BaseT - retirados da literatura, características semelhantes a de equipamentos em utilização na Presidência da República.	31
3.2	Parâmetros rede POL - retirados da literatura, características de equipamentos utilizados em POL de alguns órgãos públicos.	31
4.1	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com UDP echo para redes com 32 usuário/nós finais.	46
4.2	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com UDP echo para redes com 128 usuário/nós finais.	47
4.3	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com UDP echo para redes com 256 usuário/nós finais.	48
4.4	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com VoIP para redes com 32 usuário/nós finais.	50
4.5	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com VoIP para redes com 128 usuário/nós finais.	51
4.6	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com VoIP para redes com 256 usuário/nós finais.	52
4.7	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com HTTP para redes com 32 usuário/nós finais.	54
4.8	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com HTTP para redes com 128 usuário/nós finais.	55
4.9	Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em <i>bytes</i> nas simulações com HTTP para redes com 256 usuário/nós finais.	56

Capítulo 1

Introdução

Equipamentos de transmissão de dados utilizam energia elétrica não apenas por meio do envio de dados propriamente ditos, como também por necessidade de refrigeração em determinadas situações. Com o amplo consumo de redes de dados, caracteriza-se oportunidade para pesquisas de redução de consumo de energia, relacionando-se estes estudos com a área de conhecimento conhecida por TI verde (oriundo do termo em inglês *Green IT*), conforme encontramos na obra de Murugesan and Gangadharan [4], podendo os conceitos serem aplicados em redes de comunicação, conforme obra de Peoples et al. [5].

Neste diapasão, cumpre aos profissionais e pesquisadores em infraestrutura de TI (Tecnologia da Informação) pesquisar como reduzir o consumo de energia elétrica sem comprometer a capacidade de processamento e transmissão de dados, especialmente quando servem a organizações que são grandes usuárias de redes de dados. Por sua vez, sendo o Estado Brasileiro grande usuário de tais serviços de dados, uma vez alocados os pesquisadores e profissionais de infraestrutura de TI em cargos e atividades em órgãos públicos, cabe-lhes adotar iniciativas que promovam o *Green IT* no âmbito de suas organizações.

A Administração Pública no Brasil é responsável por grande consumo de recursos materiais e energéticos, e o Estado, por meio de iniciativas como o "Esplanada Sustentável", encontrado em MPOG [6], busca promover a conscientização e promoção do papel do serviço público na economia de recursos bem como a inclusão de variáveis de impacto ambiental nas contratações públicas, incluindo as contratações de TI.

O cenário de consumo de recursos de TI por parte da Administração Pública, assim como ocorre no restante do mercado, encontra constante oportunidade de modernização de tecnologias. Em particular, quanto às tecnologias de transmissão de dados, a Administração Pública e a Presidência da República tem recebido nos últimos anos propostas de modernização de suas redes LAN (do inglês *Local Area Networks*, Redes Locais), nas quais fornecedores de equipamentos e tecnologias de transmissão de dados tem destacado

eventuais oportunidades de melhorias em diversas métricas.

Dentre as métricas destaca-se, em algumas propostas, as relacionadas à economia de energia elétrica. Em situações de aquisição de equipamentos de transmissão de dados, alegam alguns potenciais fornecedores que a utilização de POL (do inglês *Passive Optical LAN*, Redes Locais Ópticas Passivas, conforme pode ser testemunhado pelos trabalhos de Ruan et al. [7]) em lugar de LAN BaseT (onde BaseT se refere ao cabeamento em par metálico trançado) estaria relacionada a acentuada redução de consumo de energia, e por consequência de recursos financeiros, além de outras vantagens operacionais relacionadas aos custos de propriedade.

Nos órgãos públicos brasileiros, entretanto, predominam processos de compras de tecnologias da informação que não consideram adequadamente as questões de sustentabilidade ambiental e financeira conforme orientado em MPOG [6] e SLTI [8]. Contudo, tal necessidade já se encontra exarada como diretriz na literatura referenciada e em diversas normas da administração pública. Em adição, frisando-se que o consumo de recursos energéticos resulta diretamente em dispêndios financeiros, pode-se tomar as palavras de Alonso [9], que dizem que "*o bom desempenho das organizações governamentais depende da utilização racional dos recursos disponíveis*". Logo, torna-se primordial que a economia de recursos energéticos seja considerada um dever dos órgãos públicos e os meios para alcançar ou maximizar tal economia devem ser estudados quanto à sua eficiência, eficácia e razoabilidade.

1.1 Proposta do Trabalho

A presente dissertação buscou munir as organizações públicas e privadas, em especial a Presidência da República do Brasil e a Administração Pública Federal, de comparativos de consumo de energia entre redes BaseT e tecnologias PON (do inglês *Passive Optical Networks*, Redes Ópticas Passivas) do tipo POL. Utilizando análise acadêmica e científica, objetivou-se orientar que as futuras atualizações e compras e contratações de equipamentos e serviços de modernização de redes de dados adotem a tecnologia mais vantajosa, respondendo se a eventual substituição de redes LAN baseadas em tecnologias de cabeamento metálico por redes POL é sempre vantajosa com relação ao consumo de energia e com relação a recursos financeiros como alegado pelos referidos potenciais fornecedores. A própria metodologia de estudo adotada no trabalho em tela se constitui em uma proposta de atuação e avaliação técnica mediante oportunidades de alterações de tecnologia em ambientes corporativos, no caso, as organizações públicas brasileiras.

Basear as contratações e compras de equipamentos e serviços apenas em pesquisas e argumentações oriundas de empresas fornecedoras ou de fabricantes de equipamentos de

transmissão de dados se constituiria em irresponsabilidade para com o recurso público. Igualmente, orientar alterações por simples análise ou conhecimento superficial de casos específicos ocorridos em outras organizações públicas ou privadas, desconsiderando o papel e o benefício que a pesquisa acadêmica pode realizar em tais questões, pode se constituir em atitude temerária.

Por outro lado, se poderia estudar o que a academia já produziu acerca da questão de economia de energia quando da aplicação de PON em lugar de redes baseadas em cabeamentos metálicos. Entretanto, conforme se verifica, novamente em Ruan et al. [7] os cenários POL se diferenciam em diversos aspectos das redes PON aplicadas a Redes de Área Metrolopolitana, ou MAN (do inglês *Metropolitan Area Networks* - Redes Metropolitanas) e Redes de Longa Distância, ou WAN (do inglês *Wide Area Networks* - Redes de Longa Distância). Logo, nem sempre os cenários analisados pela academia quanto a redução de consumo de energia em redes WAN podem ser aplicados aos estudos de POL e LAN. Quanto aos poucos casos onde a literatura aborda redes POL, deve-se verificar se as características, informações e resultados relacionados a estas redes POL estão corretos e podem ser aplicadas de maneira generalizada, uma vez que são relativamente poucos e relativamente recentes estes estudos. Ademais, não é desvantajoso que verificações de resultados anteriormente obtidos em cenários diferentes de pesquisa ocorram, eventualmente confirmando os resultados e benefícios alegados ou demonstrados.

A presente dissertação analisou a questão por meio de aplicação da metodologia científica de análise de desempenho, como citado em epígrafe, centrada na métrica de consumo de energia das redes comparadas. Para tanto, buscou-se verificar como um trabalho acadêmico fundamenta-se quanto a análise de desempenho de sistemas, a qual exige a utilização de um método principal de partida, e métodos comprobatórios e/ou de apoio, conforme se verifica na obra de Jain [10]. No caso do presente trabalho, para a análise da métrica de consumo de energia, tornou-se necessário o conhecimento de como a literatura e a indústria de equipamentos de transmissão de dados tratam a eficiência energética, como a estudam e como a caracterizam. Com tal métrica em tela, considerou-se os métodos de análise de desempenho disponíveis.

Podendo-se avaliar os sistemas por meio de medições, modelagens analítico-matemáticas e ainda, simulações, novamente conforme a consagrada obra de Jain [10], dois destes três métodos, em conjunto, são necessários para que os resultados sejam considerados aceitáveis.

As medições podem ser complicadas por dificuldades no acesso a equipamentos e meios de aferição, o que de fato ocorreu durante a pesquisa objeto da presente dissertação. Em adição, muitas vezes podem resultar em imprecisão quanto a variáveis que não podem ser controladas nas situações ou com os recursos disponíveis. Há ainda a questão de não ser

frequente que as redes POL, ainda que experimentais, estejam construídas ou à disposição para as medições necessárias por ocasião da pesquisa.

Tendo como premissa que o estudo devia se constituir em modelo aplicável aos mais diferentes cenários, o estudo se baseou em técnicas de modelagens matemático-analíticas capazes de fornecer resultados preliminares e de fundamentar simulações computacionais, sendo portanto atendidas as condições de verificação de resultados de análises de desempenho descritas por Jain [10]. Precisamente, trabalhou-se com simulações computacionais com o NS-3 [11] orientadas por modelos matemáticos de consumo de energia baseados no volume de dados trafegados e nos tempos de funcionamento dos equipamentos de transmissão de dados.

O modelo analítico foi composto à partir de informações da literatura, tanto relacionadas com modelos analíticos de outras pesquisas e avaliações de desempenho específicas para os tipos de rede componentes do objeto da pesquisa, como relacionadas com informações dos parâmetros dos equipamentos que compuseram redes com similaridades à rede de dados existente na Presidência da República. Este modelo compilado foi aplicado tanto à rede BaseT como à rede POL concorrente. O referido modelo analítico se constituiu na base das simulações realizadas, tanto para a rede BaseT, como para as redes POL.

Os resultados, tanto provenientes do modelo analítico, como das simulações, permitiram uma análise matemática com base em curvas de consumo de energia em função do número de usuários atendidos com o volume de tráfego dentro de intervalos menores ou iguais aos consumos máximos de banda possível aos equipamentos empregados, sempre buscando similaridades, novamente, com o caso concreto da Presidência da República, considerando o melhor aproveitamento possível dos recursos disponíveis na composição dos enlaces.

Simulações permitem que sejam verificadas diversas possibilidades para transmissão de dados e consumo de energia, muitas vezes aplicáveis a cenários, sistemas e equipamentos a serem construídos em tempo futuro. Dado que parte dos objetivos específicos se relaciona com cenários reais de compras de equipamentos de transmissão de dados e serviços de modernização das redes de dados, a pesquisa não se furtou a fornecer resultados para situações de instalações de redes utilizando equipamentos disponíveis no mercado ou com padrões já definidos e que, portanto, muito em breve devem compor mecanismos em equipamentos à venda. No entanto, apenas mecanismos e capacidades oficialmente padronizadas foram adotadas.

1.2 Contribuições

O **objetivo** geral da dissertação foi: *Comparar consumos de energia elétrica em redes locais baseadas em meios de transmissão metálicos (Redes BaseT) e em meios de transmissão ópticos (Redes POL), verificando se a adoção de Redes POL em substituição a Redes BaseT apresentaria vantagens segundo métricas de consumo de energia e por consequência de valores financeiros derivados da projeção de consumo de energia.*

A **hipótese** suscitada ao início dos trabalhos foi a de que *a troca de tecnologia BaseT por POL não é inequivocamente vantajosa em termos energéticos.* O resultado de economizar ou não energia depende das características dos equipamentos empregados nas redes BaseT e POL, empregando a última um grande volume de equipamentos ONUs, e portanto a vantagem da rede POL não consiste em um fato absoluto e inequívoco em relação à métrica de economia de energia.

Para alcançar uma comparação das redes e um julgamento da hipótese aceitável, trabalhou-se alguns **objetivos específicos**, os quais compuseram, de fato, algumas contribuições realizadas por este trabalho. A primeira delas consistiu em um entendimento da modelagem analítica dos consumos de energia de cada uma das redes em comparação. Ao final, se obteve, com base em um conjunto de contribuições anteriores disponíveis na literatura, um modelo aplicável tanto às redes BaseT como às redes ópticas. Realizou-se ainda simulações das redes comparadas a fim de se obter o comportamento do consumo de energia de cada uma delas, o que permitiu a comparação dos resultados de consumo de energia.

Caracterizado o problema que foi estudado na presente dissertação, informa-se a composição do restante do documento, o qual se organiza da seguinte forma: o Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, por meio da qual é apresentada os conceitos relacionados a definições de TI verde, características e definições relacionadas a redes BaseT e POL, caracterização dos respectivos consumos de energia das redes comparadas e modelagem das avaliações de desempenho, ou seja, discute o estado da arte em trabalhos correlatos. No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada para o experimento, qual seja, as etapas principal e acessória da avaliação de desempenho, considerando os conceitos relacionados no capítulo anterior. No Capítulo 4 se discute e se analisa os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5 se apresenta as conclusões do estudo.

Capítulo 2

Conceitos Básicos e Revisão da Literatura

No Capítulo 1 conheceu-se o problema que a presente dissertação se propõe a tratar, a qual se concentra em analisar se a substituição de redes BaseT por redes PON aplicada em redes locais proporciona economia de energia elétrica e de recursos financeiros para uma organização. Neste segundo capítulo, será conhecida a literatura correlata, objetivando revisar os conceitos essenciais para fundamentar a verificação do problema. Inicialmente, na Seção 2.1, são revisados os conceitos concernentes a redes *BaseT*, redes ópticas e redes POL. Na Seção 2.2 são revisados os conceitos e modelos relacionados ao consumo de energia para os dois tipos de redes em análise, sendo abordado ao final do capítulo, na Subseção 2.2.4 o uso dos modelos estudados em simulações em estudos de uso de energia em redes de transmissão de dados. Posteriormente, no Capítulo 3, será abordada a metodologia proposta para o experimento desta dissertação.

2.1 Redes BaseT, Redes Ópticas e POLs

Na presente seção serão apresentados alguns conceitos acerca de redes de transmissão de dados necessários para a caracterização do cenário das redes em avaliação e comparação.

2.1.1 Redes *BaseT*

O primeiro modelo de redes em análise consiste em redes de dados tradicionais, construídas com equipamentos que se comunicam utilizando como meio físico o cabo de cobre em par trançado, ou seja, as redes *BaseT* (onde o "T" simboliza o termo em inglês *twisted pair*). Especificamente, no presente trabalho se trata de redes *BaseT* aplicadas a uma área local, uma LAN. Comumente estas redes funcionam com base no protocolo *Ethernet*

(IEEE 802.3) Kurose and Ross [12]. Doravante, a presente dissertação utiliza o termo *BaseT* para se referir a uma rede com cabeamento metálico em par trançado utilizando *Ethernet* na camada de enlace.

Como se pode observar no livro de Kurose and Ross [12], além dos computadores e outros tipos de componentes de nós finais presentes em uma rede de computadores, como servidores e impressoras (provedores dos recursos compartilhados citados anteriormente), esta rede é composta dos equipamentos responsáveis pelo encaminhamento dos dados, segmentos e datagramas das camadas superiores, por meio de bits componentes dos sinais físicos. Tais equipamentos geralmente recebem nomes relacionados com a camada e protocolos nos quais se baseia o trabalho de encaminhamento dos dados.

Caso o equipamento trabalhe com base em protocolos da camada de Enlace, é considerado uma *Bridge* ou um *Switch*, sendo que o último é o mais usual em virtude de sua capacidade de trabalhar com endereçamento dos nós, o que evita colisões de dados.

Caso o equipamento trabalhe com base em protocolos da camada de Rede, é considerado um roteador. Roteadores foram inicialmente aplicados a redes WAN, pois os endereços IP permitiram que fossem endereçados dispositivos mundialmente e as rotas e endereços se basearam em acordos internacionais na maior parte ainda vigentes.

Há equipamentos que possuem disponíveis as capacidades de um switch e de um roteador. Não havendo impedimento para que redes locais possam realizar roteamento de pacotes, e considerando tais capacidades em um mesmo dispositivo, continua-se classificando o equipamento aplicado em LAN como um *switch*, sendo conhecido por *switch* de camada 3, existindo ainda switches com capacidades ou protocolos de camadas ainda mais superiores (4 a 7).

A rede *BaseT* instalada na Presidência da República do Brasil, consiste em uma rede com topologia predominantemente do tipo *estrela*, com alguns trechos utilizando topologia *árvore*, sendo os *switches* os nós centrais das estrelas, havendo agregações de *switches* para interconectar os conjuntos. Assim, quando dos experimentos verificou-se que seria trabalhada, ainda que em versão com menos nós que a rede real, uma estrutura hierárquica para diversos switches, interligando computadores em topologia estrela, detalhe que serão revisados em seções futuras.

2.1.2 Redes Ópticas Passivas - PON - e Redes Locais Ópticas Passivas - POL

Conforme se verifica nas obras de Dunlop and Smith [13] e Kurose and Ross [12] é característica comum a quaisquer forma de transmissão de dados a degradação de sinais com o aumento da distância de transmissão, enviados por meio do espectro eletromagnético,

sendo o sinal elétrico que é transmitido em cabamentos metálicos suscetível, ainda, a interferências eletromagnéticas diversas.

Em mitigação dos problemas de degradação e interferências citadas no parágrafo anterior, conforme Dunlop and Smith [13], Murthy and Gurusamy [14], Kurose and Ross [12], pode-se adotar as redes que utilizam como meio de transmissão as fibras ópticas, que conforme o próprio nome, utilizam espectro visível (luz), guiado por meio de fibras transparentes, para a transmissão de dados.

Contudo, como se pode verificar em Murthy and Gurusamy [14], Hirafuji [1], Lam [15] e Kramer [16], a existência de interfaces ópticas para os enlaces nem sempre é suficiente para caracterizar as redes ópticas passivas. A rede óptica passiva (nome oriundo do inglês, *Passive Optical Networks* - PON) conta com a presença de elementos capazes de conduzir o sinal de luz entre o Terminal de Linha Óptica (nome oriundo do inglês, *Optical Line Terminal* - OLT), que desempenha um papel de nó central, e as unidades de rede óptica (nome oriundo do inglês, *Optical Network Unit* - ONU), que completam o enlace no lado dos múltiplos clientes da rede, sendo que nenhum destes elementos entre a OLT e as ONU seja consumidor de energia elétrica ou realize o encaminhamento ou distribuição de pacotes, sendo portanto elementos passivos, geralmente *splitters* ópticos (*optical splitters* em língua inglesa), conforme pode-se comparar nas Figuras 2.1 e 2.2 à seguir. Não havendo elementos ativos para endereçamento dos pacotes enviados, muitas vezes o reconhecimento do receptor de que o pacote a ele está endereçado se baseia em frequências de luz específicas ou em dados inseridos nos cabeçalhos dos pacotes.

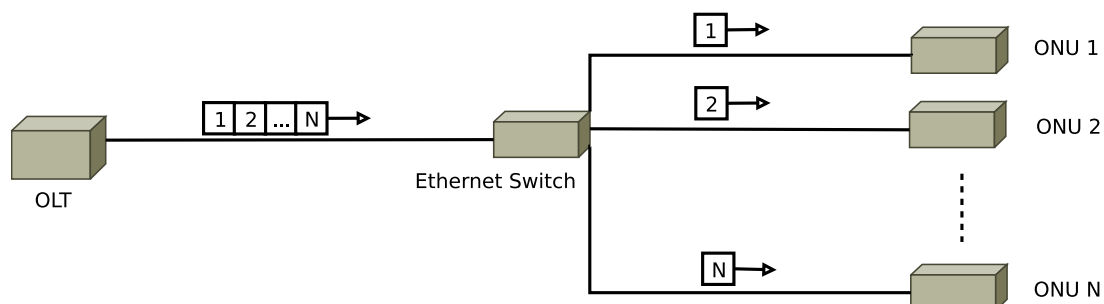


Figura 2.1: "Rede Óptica Ativa", baseada em Figura de Hirafuji [1]

Tipicamente as redes PON apresentam uma topologia do tipo *estrela* também com presença de trechos que caracterizam a topologia *árvore*. Quanto à classificação geográfica das redes PON, foi citado acima que surgem para mitigar problemas de atenuação de sinal e de interferências, problemas mais acentuados em redes de telecomunicações, o que justifica que as redes ópticas sejam mais comumente aplicadas a redes MAN e WAN.

Entretanto, na obra de Lam [15] se verifica que as redes PON podem ser instaladas *indoor*, ou seja, ainda que originalmente projetadas para redes WAN, as aplicações em

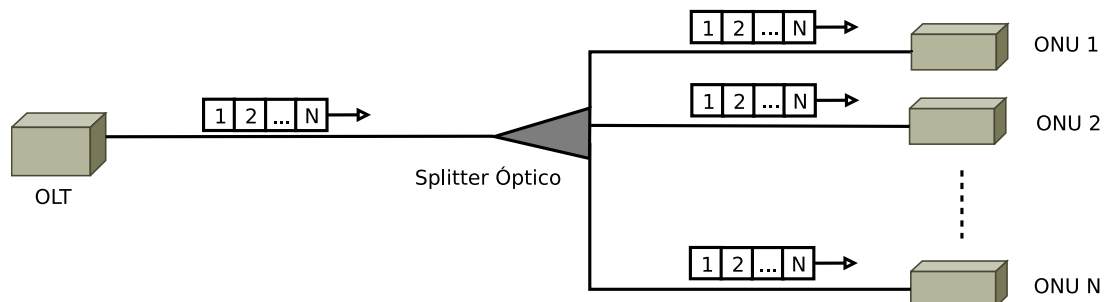


Figura 2.2: Rede Óptica Passiva, baseada em Figura de Hirafuji [1]

redes locais não são vedadas e tampouco podem ser considerada uma novidade. Desta forma, como exemplo pode-se constatar nos trabalhos de Ruan et al. [7] e Radovanovic et al. [17] que as redes que utilizam transmissão óptica, em especial as redes PON, encontram aplicação da tecnologia óptica passiva em redes locais, ocasião em que as redes são chamadas de POLs (do inglês, *Passive Optical LANs*), configuração de interesse da presente dissertação.

Por fim, é importante frisar que o protocolo *Ethernet* pode ser utilizado sobre a topologia das redes ópticas passivas, de onde provém a terminologia *EPON*, conforme Kramer and Pesavento [18]. Esta situação também pode compor as POLs, novamente, foco da análise em tela.

2.2 Consumo de Energia em Equipamentos de Transmissão de Dados

Nesta seção apresenta-se um pouco da bibliografia relacionada com estudos de economia de energia em equipamentos destinados à transmissão de dados. Inicia-se conhecendo aspectos gerais, por meio de abordagens que trazem princípios aplicáveis a análises de quaisquer redes de transmissão de dados. Contudo, nem sempre as abordagens tratadas em subseções específicas são exclusivas de cada meio de transmissão, mas sim, são encontradas em trabalhos e pesquisas que tiveram como objeto de estudo a tecnologia que titula a subseção. Assim, encontramos subseções com princípios e estratégias gerais, estudos de energia e economia de energia em redes com cabeamento metálico e estudos de energia e economia de energia em redes ópticas passivas, tratando ao final um pouco sobre simuladores de redes.

2.2.1 Princípios e Estratégias Gerais em Estudos de Consumo e Economia de Energia em Redes de Transmissão de Dados

Para tratar de economia de energia é necessário, inicialmente, entender a maneira pela qual a energia é consumida e, eventualmente, desperdiçada. Tal princípio pode ser encontrado em diversos trabalhos sobre economia de energia com transmissão de dados, conforme exemplificado pelos trabalhos de Hinton et al. [19], Ramli et al. [20], Lee and Chen [2], Orgerie et al. [21], Kaup et al. [22], não sendo a lista aqui apresentada exaustiva.

Hinton et al. [19] apresenta em seu artigo 4 estratégias para tratar de economia de energia na Internet, as quais podem ser aplicadas a redes de comunicação, quais sejam:

- Utilizar equipamentos que reduzam o consumo de energia quando fora de uso. Este estado de baixa potência é muitas vezes referido como um *sleep* ou *idle* e pode ser implementado ao inativar partes do dispositivo que não são necessárias quando o equipamento não está se comunicando. O dispositivo não pode ser desligado por completo porque perderia contato com a rede. Uma pequena quantidade de energia deve ser usada para garantir que a rede está ciente de que o dispositivo está disponível e capaz de ser utilizado quando necessário. Em virtude dos componentes eletrônicos poderem operar em velocidades muito altas os estados *sleep* ou semelhantes podem ter sua duração medida em frações muito pequenas do segundo, permitindo que tal funcionalidade seja possível, muito eficaz em reduzir o consumo de energia;
- Reduzir a taxa de processamento de um dispositivo quando a carga de trabalho for baixa. Muitos dispositivos podem operar em grande variedade de taxas de bits ou *throughput*. Os circuitos eletrônicos consomem menos energia quando operam em velocidades menores. Assim, quando a carga de tráfego em um dispositivo é baixa, o consumo de energia pode ser reduzido pela redução da velocidade no qual o dispositivo funciona. Isso é muitas vezes referido como *taxa de adaptação*, a qual Hinton et al. [19] destaca dos trabalhos de Nedeveschi et al. [23]. Busca-se neste tipo de abordagem um enfoque em protocolos mais eficientes, conforme Hinton et al. [19] resgata no artigo de Barrass et al. [24].
- Melhorar a eficiência energética dos roteadores principais, componentes do núcleo da rede e grandes *backbones*. Isso requer melhorar a tecnologia de processamento de sinal dos equipamentos ou suas funções. Além disso, utilizar estratégias para dimensionar os *backbones* para melhorar a eficiência energética torna-se cada vez mais importante à medida que o núcleo da rede se torna o principal item de consumo de energia. Segundo Hinton et al. [19] essa estratégia tende a ser objeto de diversos trabalhos na atualidade.

- Utilizar a tecnologia de rede de acesso mais eficiente em termos de energia. O domínio dos equipamentos de rede de acesso é um foco claro para melhorar a eficiência energética das redes.

Tomando as estratégias de Hinton et al. [19] verifica-se que são baseadas em redução do consumo sempre que o equipamentos ou as técnicas assim possibilitarem e alocar estes equipamentos mais eficientes na rede sempre que possível.

O artigo de Kaup et al. [22] procura explorar ideias como as de Hinton et al. [19] para *switches* aplicados a redes definidas por software, das quais se pode visualizar exemplos e definições nos trabalhos de Bispo et al. [25] e Oktian et al. [26]. Kaup et al. [22], porém, estuda redes com características diferentes das redes em estudo pela presente dissertação, mesmo porque as *SDN*, tecnologia relativamente recente, procuram fazer dos equipamentos de redes *commodities*, e ainda não são empregados largamente em redes locais. O estudo de economia de energia de Kaup et al. [22] porém se alinha a ideia de que a engenharia de tráfego e protocolos podem contribuir com a economia de energia dos equipamentos utilizados na transmissão de dados.

Muitos trabalhos tem se orientado na questão dos estados de baixo consumo de energia, como os estados *sleep* ou *idle*. Entretanto aspectos como o de mudança de estados de repouso para estados ativos podem afetar a eficiência em termos de transmissão de dados, causando algumas vezes indesejáveis perdas de pacotes. O aumento de estados que diminuam o consumo de energia mas que mitiguem a degradação do *throughput* do equipamento, ou a melhoria de eficiência em estados já existentes tem sido a abordagem de diversos autores, exemplificados por Lee and Chen [2] ou Gondim et al. [27]. A contribuição de trabalhos com esta abordagem não se limita apenas a esta melhoria de eficiência energética e de *throughput*, mas contribui com um aspecto já mencionado e fundamental à esta área de pesquisa: a modelagem de consumo de energia. Lee and Chen [2], por exemplo, apresenta o modelo de mudança de máquinas de estado, conforme demonstrado na Figura 2.3. A compreensão de modelos como este é fundamental, pois permite que o problema comece a ser compreendido como uma questão de quanta energia o componente ou equipamento consome em um determinado estado e por quanto tempo permanece neste estado.

A métrica de economia de energia pode resultar em outras métricas derivadas. Ramli et al. [20], por exemplo, procura quantificar o impacto de economia de energia quanto a emissões de carbono na atmosfera quando da adoção de redes mais eficientes. O estudo apresentou resultados relacionados a implementação de redes PON na Malásia, indicando considerável redução de emissões. Métricas derivadas da economia de energia podem motivar novos estudos de redução do consumo de energia, incluindo não apenas o aspecto

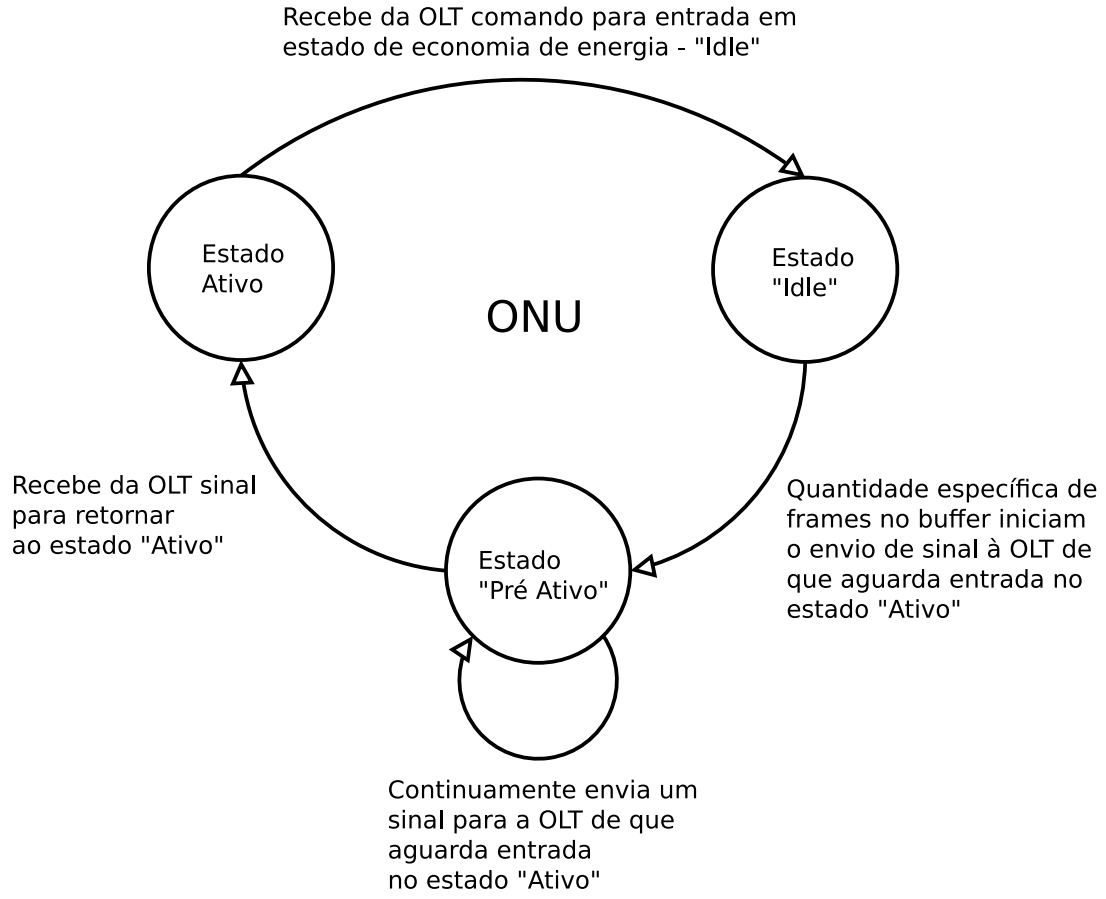


Figura 2.3: Transição de estados de uma ONU, baseada em Figura de Lee and Chen [2]

ambiental, como também o aspecto econômico, o que pode corroborar ações adequadas a iniciativas como a *Esplanada Sustentável* [6].

Alguns trabalhos apresentam uma abordagem que reúne diversas das técnicas citadas em epígrafe. Orgerie et al. [21] procura estabelecer um modelo de custo relacionado ao consumo de energia em redes de dados. Nesse trabalho, o modelo se baseia nos equipamentos utilizados e suas diversas tecnologias de processamento e transmissão, passando pelos componentes do equipamento, o que gera um modelo de consumo de energia para os equipamentos individualmente, sendo o consumo da rede derivado do somatório dos consumos dos equipamentos empregados. Orgerie et al. [21] realiza ainda simulações com o simulador de redes *NS-2* [28]. Dos trabalhos até aqui citados, mas exemplificando por meio do que encontramos em Orgerie et al. [21], tem-se que o consumo por equipamento é dado por:

$$E(T) = \int_0^T P(T)dt \quad (2.1)$$

Ou seja, a Equação 2.1 acima é uma simples equação que relaciona o consumo total

com consumo em relação ao tempo em que o equipamento funciona, sendo P a potência e T o tempo. Logo, a variável derivada *custo*, denotada por D , pode ser obtida com base na Equação 2.2 abaixo, também obtida de Orgerie et al. [21], onde $NbkWh$ denota o consumo em kWh - *kilowatt x hora* (potência x tempo, a qual reflete a energia em *Joules* (J) que equivale a $W*s$ - *watt * segundo*):

$$D(E) = \sum_i NbkWh(t_i)Preço(t_i) \quad (2.2)$$

As Equações 2.1 e 2.2 acima estão simplificadas. Há de ser considerado que os consumos por estado são diferentes e em verdade se verifica que modelos como o da Equação 2.3, presente em Yan and Dittmann [29] elucidam melhor os termos relacionados a consumos em estados constantes dos modelos de transição de estados dos equipamentos, no caso, *awake* e *sleep*:

$$E = \sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^N T_i^n [s_i^n P_{awake} + (1 - s_i^n) P_{sleep}] \quad (2.3)$$

onde T representa o tempo em que a máquina ou componente permanece num determinado estado, em uma determinada vez pela qual o ocupa. K e N se referem às quantidades de vezes que a máquina ocupa cada um dos dois estados (*awake* e *sleep*). E por fim, P representa uma quantida de potência consumida em um dos estados.

Com base nas obras bibliográficas citadas no parágrafo anterior, pode-se obter então que o consumo de energia do equipamento seria dado pela Equação 2.4 à seguir, considerando n estados possíveis, onde S e s representam as visitas a um determinado estado, T representa o tempo de permanência em um estado visitado e P representa a potência de energia para o estado:

$$E = \sum_{s1=1}^{S1} \sum_{s2=1}^{S2} \dots \sum_{sn=1}^{Sn} T_i^n P_i^n \quad (2.4)$$

Os equipamentos de transmissão de dados encontram muitas vezes a necessidade de uma temperatura limite para trabalharem. Neste sentido muitos autores como Pickavet and others [30], Moore et al. [31], Murugesan [32] e Greenberg et al. [33] destacam há muitos anos que grande parte do comprometimento de consumo de energia relacionada a ativos de TI derivam da necessidade de refrigeração, sendo este o alvo de muitas ações ou recomendações de economia de energia.

Neste sentido, torna-se evidente que além das equações relacionadas ao consumo de energia dos equipamentos, pode ser necessário que muitas vezes a quantificação de economia de energia da rede considere a energia consumida com refrigeração dos ativos de rede. A energia demandada para a manutenção de uma temperatura específica pode va-

riar de acordo com diversos fatores, como temperatura ambiente externa à sala onde está o equipamento, quantos equipamentos estão alocados em uma sala, quantas fontes de refrigeração e qual sua potência, umidade do ar, dentre outras. Estudando trabalhos como Baliga et al. [34] e Koomey et al. [35], verifica-se que ao invés de limitar-se os estudos de consumo de energia que consideram a refrigeração como um fator a situações específicas, pode-se tomar estimativas diversas para o consumo de energia com refrigeração, muitas vezes tomando um teto para tal consumo ou intervalos que são capazes de estimar o consumo para diferentes locais e condições, tendo tal consumo, contudo, relação direta com o consumo do equipamento para a transmissão de dados, sua função primordial.

Logo, em alguns casos pode ser necessário incluir, por exemplo, um novo termo à Equação 2.4, a qual totaliza o consumo de energia para um determinado equipamento. Além dos estados do equipamento, do tempo em que se permanece em cada estado e do número de vezes que o equipamento passa pelo estado, há o consumo com refrigeração, que no caso da Equação 2.5 está considerando que não há variação da quantidade de energia instantânea para manter o equipamento na temperatura que se deseja durante o tempo de simulação, medição ou período de funcionamento - o fator P_r .

$$E = \sum_{s1=1}^{S1} \sum_{s2=1}^{S2} \dots \sum_{sn=1}^{Sn} T_i^n P_i^n + P_r \sum_{s1=1}^{S1} \sum_{s2=1}^{S2} \dots \sum_{sn=1}^{Sn} T_i^n \quad (2.5)$$

Reescrevendo a Equação 2.5 com base em equivalências matemáticas, simplifica-se na forma da Equação 2.6 à seguir:

$$E = \sum_{s1=1}^{S1} \sum_{s2=1}^{S2} \dots \sum_{sn=1}^{Sn} T_i^n (P_i^n + P_r) \quad (2.6)$$

O consumo total de energia elétrica E_T de uma rede de transmissão de dados seria o somatório simples da energia consumida pelos equipamentos que compõe a rede, conforme a Equação 2.7, onde k representa o índice de um equipamento, o qual teria sua energia medida conforme a Equação 2.6.

$$E_T = \sum_{k1=1}^K E_k \quad (2.7)$$

É importante destacar que para qualquer das redes analisadas há um consumo de energia máximo possível, que ocorre quando a máquina permanece o tempo todo em estado ativo e um consumo mínimo possível com a máquina ligada. O consumo mínimo ocorre quando os consumos referentes às portas são mínimos, o que ocorre quando as portas em uso permanecem o tempo todo em estados "*idle*" e as demais desligadas, o que gera, por sua vez que parte da equação, a correspondente aos estados pelos quais a máquina não passa no período de tempo da análise.

Segundo o que se observa em Orgerie et al. [21], pode-se verificar que as parcelas da Equações 2.4 a 2.7 relacionadas com o estados ativos podem ser compreendidas como momentos onde a máquina ou componente está, de fato, trafegando dados. Neste sentido, é possível fazer uma relação do consumo de energia no estado ativo com o consumo de energia consumido com cada byte trafegado dentro de uma certa unidade de tempo. Isso permite que um dado componente ou equipamento possua a seguinte Equação para o cálculo da energia consumida, por exemplo, por uma porta:

$$E_p = T * (C_{b_p}) + N_{bytes_p} * E_{byte_p} \quad (2.8)$$

onde T é o tempo considerado, C_{b_p} a energia consumida pela porta em repouso, N_{bytes_p} a quantidade de *bytes* que trafegam na porta durante o período considerado e E_{byte_p} a energia consumida para cada byte trafegado pela porta. A Equação 2.8 acima encontra algumas simplificações em relação a situações reais. Por exemplo, não está tratando dos tempos de chaveamento entre os estados e está considerando, de fato, apenas dois estados, ativo e *idle*. No entanto, estas simplificações são adotadas ao longo de todo o trabalho para todos os tipos de redes consideradas e não são suficientes para invalidar os resultados, como é demonstrado nas discussões nos Capítulos 4 e 5.

Os equipamentos submetidos ao tipo de avaliação que a presente dissertação aborda costumam ser compostos por vários tipos de portas. Assim, a Equação 2.8 pode ser estendida para a Equação 4.1 à seguir:

$$E_{eq} = T * (C_{b_{eq}} + C_{b_{p1}} + C_{b_{p2}} + \dots + C_{b_{pn}}) + N_{bytes_{p1}} * E_{byte_{p1}} + N_{bytes_{p2}} * E_{byte_{p2}} + \dots + N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}} \quad (2.9)$$

onde T é o tempo considerado, $C_{b_{eq}}$ a energia consumida pelo equipamento em repouso, $C_{b_{pn}}$ a energia consumida pela *enésima* porta em repouso, $N_{bytes_{pn}}$ a quantidade de *bytes* que trafegam na *enésima* porta durante o período considerado e $E_{byte_{pn}}$ a energia consumida para cada byte trafegado pela *enésima* porta. $C_{b_{pn}}$ e $E_{byte_{pn}}$ variam de acordo com o tipo de porta (BaseT ou POL, banda e equipamento). A energia consumida pela rede consistiu no somatório simples das energias consumidas pelos equipamentos utilizados. Este é o modelo que é efetivamente utilizado na avaliação de desempenho realizada na pesquisa em tela. Destaca-se que esta equação está considerando desprezíveis os tempos de mudança de um estado para o outro e considera que o estado *idle* tem um consumo médio ponderado entre os tempos de efetiva redução de consumo de energia e períodos de *refresh*, evento que será destacado nas seções à seguir.

Considerados os aspectos, conceitos e princípios em tela, passa-se às próximas subseções onde serão conhecidos trabalhos relacionados à eficiência energética em redes com cabeamento metálico e redes ópticas.

2.2.2 Estudos de Energia e Eficiência Energética em Redes com Cabeamento Metálico

Como visto na subseção anterior, o consumo de energia de equipamentos de transmissão de dados deriva, dentre outras coisas, da tecnologia utilizada em sua fabricação. Como foi demonstrado no citado trabalho de Hinton et al. [19] há estratégias que podem reduzir o consumo de energia dentro de modelo ou meio de transmissão de dados. Contudo, em considerando uma rede baseada em transmissões por cabeamento metálico, as primeiras questões a serem tratadas são que há tendência constante de degradação de sinais e o sinal do dado é elétrico. Estas duas características resultam que o aumento da distância coberta por uma rede de cabeamento metálico exige o acréscimo de *switches* como elementos ativos, tanto pelo ponto de vista do processamento de dados, quanto de consumo de energia.

Conforme Chabarek et al. [36] o aumento de switches ou placas resulta no aumento de consumo de energia também por aumento da necessidade de refrigeração dos equipamentos, uma vez que tornam-se em fontes de calor que tendem a aumentar a temperatura além de sua temperatura ideal de trabalho. Uma engenharia que busque a redução de consumo de energia não pode se furtar a considerar também este fator de refrigeração. Entretanto, como visto na Seção 2.2.1, é necessário entender todo o modelo de consumo de energia dos dispositivos utilizados, o que permite que se adote estratégias na redução do consumo. E retomando os trabalhos de Baliga et al. [34] e Koomey et al. [35], é perfeitamente possível estabelecer uma relação entre a energia consumida com refrigeração e a energia consumida com transmissão de dados. Assim, o estudo da energia consumida por equipamentos com transmissão baseada em cabeamentos *BaseT* pode e deve ser começado com base no segundo (consumo com transmissão de dados).

Mahadevan et al. [37] buscou em seu artigo trabalhar com foco em alguns aspectos dos equipamentos, como forma de modelar o consumo de energia. No caso, seu trabalho demonstra que os dispositivos como os *switches* teriam um consumo de energia derivado do consumo por porta, o qual deriva da capacidade de banda de transmissão de cada porta, seguindo, com adaptações, o modelo da Equação 2.10.

$$W = C_b + N_{p40} * 10 + N_{p10} * 5 + N_{p1} * 0.5 + N_{pf} * 0.3 \quad (2.10)$$

onde W é a potência em *Watts*, C_b é a potência do equipamento em repouso, ou seja, sem que nenhuma de suas portas estejam em uso e N_{p40} , N_{p10} e N_{p1} representam portas com capacidades para trafegar 40, 10 e 1 GB/s, respectivamente, ativas e N_{pf} representa portas *Fast Ethernet* ativas. Os valores constantes apresentados por Mahadevan et al. [37] na Equação 2.10, entretanto, podem variar de acordo com a engenharia do switch. Mahadevan et al. [37] buscou em seu trabalho, estabelecer modelos de consumo adaptativos, ou seja, o equipamento passaria a ter um consumo baseado na quantidade de portas em utilização em determinado momento. Do ponto de vista de máquinas de estado, o equipamento estaria tendo múltiplos estados possíveis que seriam baseados nas combinações entre portas ativas e inativas, embora o modelo de máquinas de estados não tenha sido o tratado no artigo. Mahadevan et al. [37] propõe um modelo adaptativo por portas, evitando o desperdício de energia de *switches* tradicionais que podem apenas ser ligados e desligados. Tal modelo se aproximaria de um modelo ideal, completamente adaptativo, onde o consumo de energia estaria linearmente relacionado com o tráfego de dados realizado pelo equipamento de rede. Seria uma aplicação das primeiras estratégias corroboradas por Hinton et al. [19].

Mahadevan et al. [37] propõe ainda 4 etapas para gerar economia de energia em redes, e há uma clara aproximação destes passos propostos por Mahadevan et al. [37] às estratégias sugeridas por Hinton et al. [19] apresentadas na Seção 2.2.1, sendo as etapas:

- Estudo de medição de consumo em larga escala para compreender os diferentes componentes, tornando-os mais eficientes;
- Utilizar ferramenta de monitoramento e análise de energia que meça com precisão o consumo dos componentes e dispositivos. Tal ferramenta pode conduzir a mudanças aplicáveis aos dispositivos, tornando seu consumo de energia mais proporcional ao uso dos dados;
- Estudar o ciclo de vida dos componentes dos dispositivos, implicando em descobertas que melhorem os futuros *switches*; e
- Buscar algoritmos de gerenciamento de energia que otimizem os dispositivos. Isso inclui a agregação de tráfego e técnicas para desligar os componentes interruptores não utilizados, bem como técnicas de entrega da carga de trabalho em um subconjunto menor de equipamentos ou componentes.

A busca por modelos matemáticos para o consumo de energia em redes com cabeados metálicos encontra diversos outros trabalhos e artigos, ora mais detalhados, ora com mais abstrações. Como exemplo, modelo matemático para o consumo de *switches* presente em Baliga et al. [34]:

$$P_{ES} = \frac{\frac{A_T N_{TU}}{1Gbps} + L_B + \frac{2A_T N_{TU}}{1Gbps}}{N_{TU} * N_P} * P_{nom} \quad (2.11)$$

onde P_{ES} representa o consumo por usuário, A_T representa a divisão do total de bits *downstream* divididos pelo número de clientes conectados ao terminal, L_B representa o número de links de *backhaul* para redes de *multicast video*, N_{TU} representa o número de portas usada nas unidades terminais, N_P representa o número total de portas do *switch* e P_{nom} representa a potência nominal do equipamento, que depende das especificações de cada modelo. Apresentado para redes de acesso, este modelo torna-se semelhante ao apresentado por [37] considerando que em LAN's, A_T se aproxima de 1Gb/s ou do valor de banda de cada porta. Ainda, em muitos *switches Ethernet* $L_B = 0$ em LAN's.

Os modelos de Baliga et al. [34] e Mahadevan et al. [37] podem em análise ser abstraídos para os modelos que foram apresentados na Seção 2.2.1, pois em verdade, acabam por orientar que a energia consumida depende das características de transmissão de dados do equipamento. Ou seja, modela-se o consumo de energia com a transmissão de dados e o tempo de funcionamento dos equipamentos. Logo, encontra-se muita proximidade entre os modelos apresentados por estes autores e o modelo proposto pela Equação 4.1 apresentado anteriormente.

Em aplicação da possibilidade de reduzir o consumo de energia sempre que possível, geralmente os momentos onde a quantidade de dados trafegados se reduz ou inexistente, encontra-se o padrão IEEE 802.3az (IEEE, do inglês, Institute of Electrical and Electronics Engineers, ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos em língua portuguesa), padrão estudado na obra de Roebuck [38], e apresentado também nos artigos de Christensen et al. [39] e Bolla et al. [40]. O padrão estabelece basicamente uma máquina de estados, que resulta num comportamento temporal onde a máquina ou porta se alterna entre estados *sleep*, *quiet* e *refresh* quando não transmite dados, conforme se visualiza na Figura 2.4 à seguir:

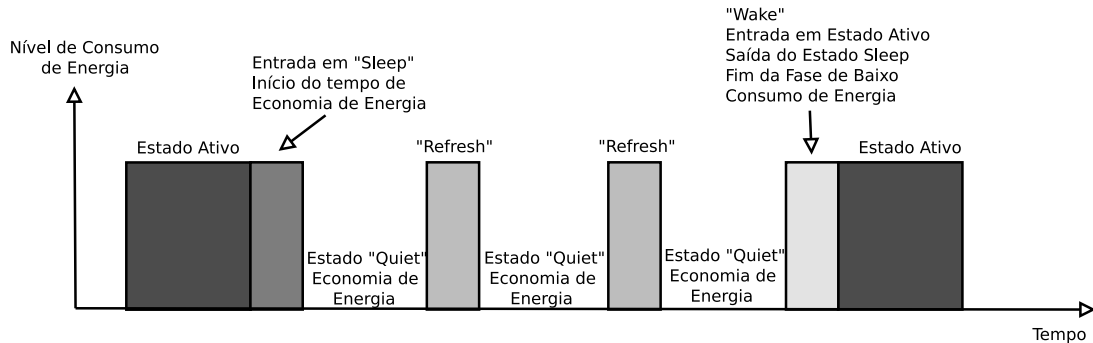


Figura 2.4: Fluxo de mudança de estados no padrão 802.3az, baseado em Figura de Pimentel [3]

É necessário relembrar que a alteração de estados entre *refresh* e *quiet* é necessária em virtude de minimizar atrasos em envio de dados decorrentes de longas permanências em estados como o *quiet*.

O padrão IEEE 802.3az trata a mudança de estados em nível de componentes transmissores e receptores de dados, como pode ser encontrado em Roebuck [38], Christensen et al. [39] e Pimentel [3]. Assim, tem-se máquinas de estados que embora semelhantes, são exclusivas do tipo de componente (transmissor ou receptor). Em ambas as situações se verifica após um estado *active* o componente entra em um estado *sleep*, sucedido por estado *quiet*. A partir do estado *quiet*, as máquinas de estado de transmissores e receptores se diferenciam um pouco, sendo que as máquinas transmissoras utilizam periodicamente o estado *refresh* o qual é utilizado para reduzir perdas quando do retorno a um estado *active* sendo o estado intermediário *wake* ou *awake* utilizado na adaptação ao adequado nível de energia de transmissão. Já no caso dos receptores, o ciclo entre os estados *sleep* e *wake* não encontra o teste ou uso do estado *refresh*.

O componente, portanto, é independente dos demais, permitindo que o equipamento tenha um comportamento que não somente depende de portas ativas, mas de componentes ativos. Assim, em uma porta seria possível as situações representadas pela Figura 2.5, onde a seta em vermelho indica transmissão de dados entre dois dispositivos na rede. A seta tracejada representa um enlace sem utilização em determinado instante, *Tx* indica transmissor e *Rx* indica um receptor. O equipamento, portanto, passa a ter uma demanda de energia com comportamento próximo ao que foi chamado em epígrafe de um modelo completamente adaptativo, ou seja, onde o consumo de energia estaria linearmente relacionado com o tráfego de dados (como demonstrado no artigo de Christensen et al. [39]).

Christensen et al. [39] ainda realiza, com base em seus modelos matemático-analíticos, simulações que atestam a economia de energia resultante do padrão em tela, bem como sua capacidade de realizar essa economia sem penalizar demasiadamente o *throughput* dos equipamentos, o que demonstra o porque tal padrão tendeu a ser adotado por diversos fabricantes. Contudo, o mercado ainda encontra uma ampla oferta de equipamentos que não fornecem a funcionalidade de economia de energia do citado padrão.

Por sua vez, Bolla et al. [40] procura estabelecer modelos analíticos que versam sobre os tempos de permanência nos estados de menor consumo de energia e seu desempenho frente a diferentes cargas de dados com o qual os dispositivos e componentes devem trabalhar. O modelo é detalhado com o objetivos de evitar erros e arredondamentos, permitindo que o consumo de energia de uma rede seja estudado com grande precisão. O padrão IEEE 802.3az é bem explorado, considerando ainda que alguns dos equipamentos estudados encontravam algumas limitações, e por isso foi destacado no artigo que o consumo de energia

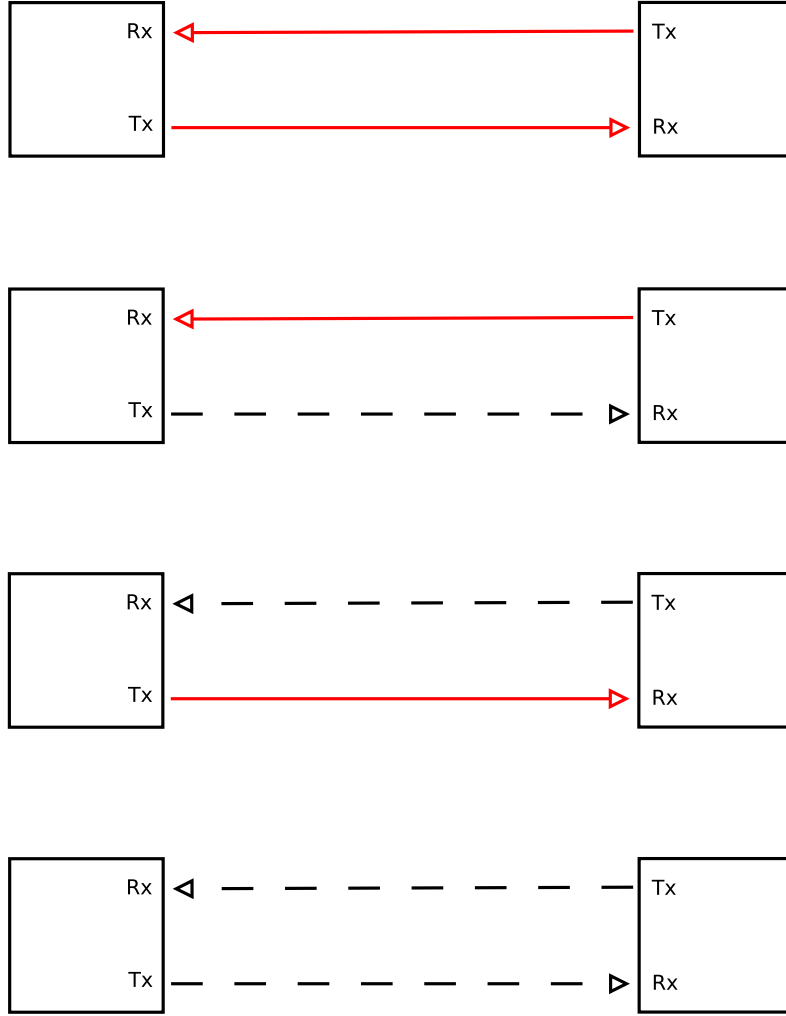


Figura 2.5: Situações de uso simultâneo ou não de transmissor e receptor entre dois equipamentos quaisquer, baseado em Figura de Pimentel [3], com adaptações. A seta em vermelho representa situação de atividade.

dependeria do status da recepção (RX) e da transmissão (TX). As transições ocorreriam de forma independente nas direções de recepção e transmissão, porém em equipamentos *1000BaseT* o link poderia somente entrar em LP se ambas as direções ficassem ociosas por certo período. Tal trabalho corrobora informações de autores abordados em epígrafe, mas destaca que as limitações de equipamentos diversos exigem cálculos adequados para o equipamento, e nem sempre baseados em componentes.

Outro trabalho que versa acerca de estudos de economia de energia em redes com cabeamento metálico, o trabalho de Vishwanath Member et al. [41]. Relativamente recente, considerando capacidades técnicas apuradas nos equipamentos, procura estabelecer o consumo de energia diretamente relacionada a carga de dados, adequando-se ao máximo ao modelo completamente adaptativo. O consumo de energia é medido inicialmente por subsistemas do *switch*, e em seguida procura estabelecer uma relação de consumo com

quantidade de dados recebidos (consumo por *bit* , ou por *byte*), um vez que estes dados demandariam os componentes receptores e transmissores de um *switch*. O trabalho permite visualizar a relação de gasto por volume de dados detalhadamente, mas o comportamento energético obtido no experimento ainda não encontra-se aplicado aos equipamentos atualmente utilizados, como o próprio artigo destaca.

Assim como a modelagem do consumo de energia, estes trabalhos muitas vezes estão relacionados com a necessidade de se obter meios para reduzir ou evitar o consumo de energia. E não raro, as abordagens passam por redesenho de protocolos e algoritmos de transmissão de dados como por exemplo em Cianfrani et al. [42], que propõe alterações em protocolo de roteamento. Trabalhos como o de Gunaratne et al. [43] por outro lado procuram trabalhar com a banda de dados como forma de construir processos de envio de dados que possam economizar energia com transmissão de dados.

A lista de abordagens acima não é exaustiva. Podes-se encontrar muitas outras abordagens, tanto para modelagens como para estratégias de redução de consumo de energia. Aqui se abordou com mais ênfase aquelas que se relacionam mais proximamente com a linha de pesquisa da dissertação, qual seja, modelar o consumo de energia dos equipamentos com base na quantidade de dados transmitidos e no tempo de funcionamento dos equipamentos.

Constata-se que os estudos de eficiência energética para as redes com cabeamento metálico, no contexto da pesquisa em tela, estão direcionados a utilizar o modelo de máquina de estados com a aplicação ou não do padrão IEEE 802.3az. Há de ser lembrado que em virtude das características dos switches, a questão do consumo com refrigeração pode se constituir em fator a ser trabalhado em alguns cenários abordados pelo presente documento.

Na próxima subseção será conhecido o cenário para as redes PON e POL, demonstrando em que direção tem seguido os estudos de economia de energia em redes com tecnologias de transmissão ópticas.

2.2.3 Estudos de Energia e Eficiência Energética em Redes Ópticas Passivas

Segundo Kantarci and Mouftah [44], as redes ópticas são capazes de mitigar grande parte dos problemas relacionados ao alcance das redes de dados e da distribuição de conteúdos. Entretanto, é destacado em seu trabalho que a questão de economia de energia continua a ser uma questão sobre a qual as pesquisas em redes ópticas precisam se atentar.

Para redes ópticas é relativamente ampla a literatura acerca de economia de energia, mesmo porque a própria adoção de redes ópticas pode estar relacionada também com a economia de energia, conforme orientado por autores como Kramer and Pesavento [18].

Parte dos esforços dos estudos em tela se destina, assim como citado anteriormente nesta dissertação, a caracterizar o consumo de energia em redes com transmissão óptica. Quantificar a energia consumida com transmissões de dados, incluindo redes ópticas foi parte do objeto do trabalho de Baliga et al. [34], apoiando a estimativa do quanto é consumido com transmissão de dados na Internet, o que demonstra que tais estudos são importantes quando se verifica que o consumo de energia com transmissão de dados já possui volume consideravelmente alto.

Ainda no sentido de caracterizar o consumo de energia com redes de transmissão de dados por tecnologias ópticas, Zhang et al. [45] realiza um *survey* de tecnologias e algoritmos de tráfego de dados, buscando verificar os mais eficientes quanto a alocação de recursos e consumo de energia. Esta abordagem se alinha portanto com as estratégias destacadas por Hinton et al. [19].

As obras de Kramer [16] e Lam [15] destacam que o modelo de máquinas de estados para redes ópticas já se encontra consolidado. Assim, o emprego de tal abordagem para estudos de consumo de energia em redes ópticas encontra lastro e é largamente aplicado. Há inclusive, conforme exemplificado nos trabalhos de Gondim et al. [27] e Hirafuji et al. [46], padrões de economia de energia para componentes dos equipamentos, como os contidos na norma *ITU-T G.987.3* [47], baseados na concepção de fluxo de máquinas de estado no tempo.

Também com tais premissas em destaque, o artigo de Shi et al. [48] procura estabelecer resultados de economia de energia quando do uso de estados *sleep* em equipamentos de redes ópticas. O trabalho se baseia no fato de que o estado *sleep* aplicado sem qualquer sofisticação ou ajuste ocasiona os já citados atrasos em transmissões quando do reinício das transmissões. Assim, Shi et al. [48] propõe acordos de níveis de serviços diversos para que os tempos de permanência em estados *sleep* sejam ajustados de maneira variável de acordo com o comportamento desejado para os equipamentos da rede, alterando portanto o fluxo de estados no tempo. A máquina de estados utilizada por Shi et al. [48], entretanto, é uma máquina simples, que simplificada considera os estados ativo e inativo para os dispositivos.

Wang et al. [49], por sua vez, busca também estabelecer critérios para permanência dos equipamentos em estados *sleep*. Sua abordagem, porém, está baseada no comportamento dos usuários da rede. Baseado num comportamento histórico dos usuários seria possível determinar que determinados equipamentos, como ONUs ou OLTs, pudessem ter seus tempos de *sleep* previamente alterados, maximizando a economia de energia sempre que

possível.

Abordagem semelhante é adotada no artigo de Zulai et al. [50], onde é criado um algoritmo de controle de potência que estabelece a potência considerada ideal na transmissão em cada unidade de rede óptica de acordo com os requisitos de qualidade de serviço pré-definidos da rede. O objetivo, segundo o artigo, é controlar o consumo de energia da ONU de acordo com a demanda de tráfego ajustando sua potência de transmissão na tentativa de maximizar o número de bits transmitidos com um consumo mínimo de energia.

Conforme destacado, uma questão fundamental está relacionada a maximizar a permanência em estados de baixo consumo de energia sem que os requisitos de qualidade, especialmente com relação a atrasos de transmissão, sejam demasiados. Sob esta perspectiva Yan and Dittmann [29], por exemplo, procuram estabelecer parâmetros de alocação de estados semelhantes ao *refresh* para redes ópticas, e o tempo de permanência nos estados *sleep* também são alterados, assemelhando-se aos trabalhos anteriores no que concerne a uma preocupação com acordos de nível de serviço.

A questão de acordos de nível de serviços é importante o suficiente para que as citadas técnicas de economia de energia incorporadas aos padrões da ITU-T [47] previssem diferentes estados de economia de energia, que no entanto, geram um fluxo de estados no tempo muito semelhante ao adotado para o padrão IEEE 802.3az. Esses diferentes padrões podem ser compreendidos dos artigos de Gondim et al. [27] e de Hirafuji et al. [46], conhecidos como *doze mode* e *cyclic sleep mode*. A grande diferença entre os dois está relacionada ao consumo de energia nos estados *sleep/listen*, bem como quando do uso dos estados *aware*, conforme pode-se visualizar na Figura 2.6.

É possível visualizar que a diferença dos níveis de energia nos estados *sleep/listen* do *cyclic sleep mode* e do *doze mode* é que no segundo apenas o transmissor entra em estado de economia de energia, sendo que nos dois o *refresh*, agora denominado *aware* consome o mesmo nível de energia do estado ativo, mas por um período de tempo bem curto.

Os trabalhos de Hirafuji [1] buscaram melhorar o consumo relacionada a redes ópticas por meio de alterações relacionadas aos fluxos temporal dos estados e seus respectivos níveis de consumo de energia exemplificados na Figura 2.6. Em suma, o trabalho agrega as qualidades do *Cyclic Sleep Mode* e do *Doze Mode*, sendo resultante o padrão *Watchfull Sleep Mode* que foi incorporado aos padrões da ITU, pois a alteração da máquina de estados e de energia consumida apresentada revelaram grande potencial de economia de energia, o que foi demonstrado com a realização de simulações de eventos discretos com o uso do simulador *OMnet++* [51]. Na Figura 2.7 é possível visualizar o fluxo de estados no tempo do *Watchfull Sleep Mode*.

Conforme se pode observar na Figura 2.7, o padrão *watchfull* agora reduz o consumo dos dois componentes da porta, o transmissor e o receptor, mas durante alguns ciclos, há

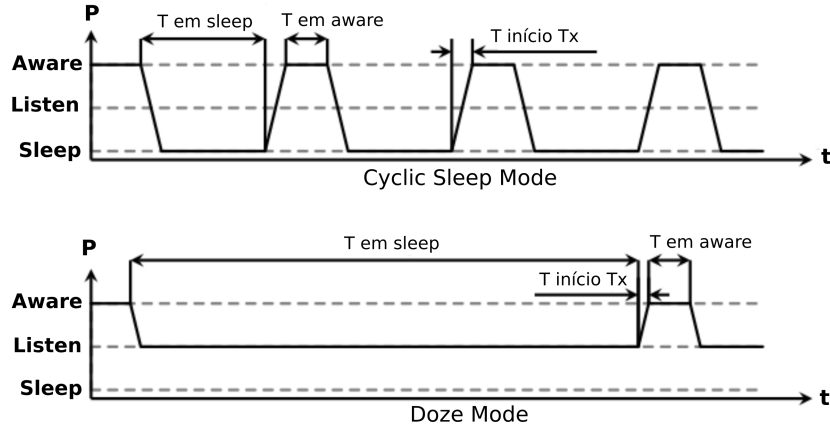


Figura 2.6: Consumo de energia durante fluxo de estados de baixo consumo em *Cyclic Sleep Mode* e *Doze Mode*. Figura extraída de Hirafuji [1]. *Aware*, *Listen* e *Sleep* são estados possíveis para a porta da ONU. P representa a potência e t o tempo. T representa o tempo em um determinado estado ou período de transição. Sendo Tx o componente transmissor e Rx o componente receptor, encontra-se em *Aware*: Tx ativo e Rx ativo, em *Listen*: Tx inativo e Rx ativo e em *Sleep*: Tx inativo e Rx inativo

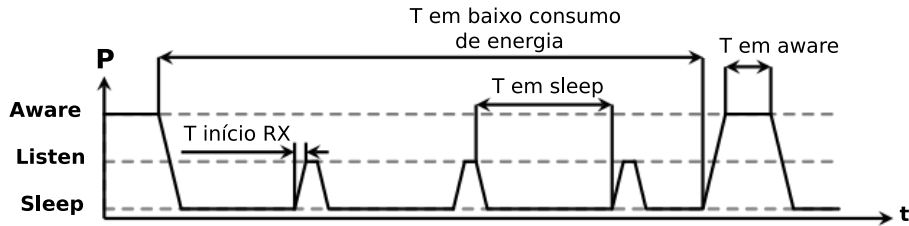


Figura 2.7: Consumo de energia durante fluxo de estados de baixo consumo em *Watchfull Sleep Mode*. Extraída de Hirafuji [1], com adaptações. *Aware*, *Listen* e *Sleep* são estados possíveis para a porta óptica da ONU. P representa a potência e t o tempo. T representa o tempo de permanência em um determinado estado ou período de transição. Sendo Tx o componente transmissor e Rx o componente receptor, encontra-se em *Aware*: Tx ativo e Rx ativo, em *Listen*: Tx inativo e Rx ativo e em *Sleep*: Tx inativo e Rx inativo. O *Watchfull Sleep Mode* utiliza o estado *Sleep* em alternância com o estado *Listen*.

apenas o *refresh* para o receptor, e em ciclos um pouco mais longos, para o transmissor.

A confiabilidade de que as redes ópticas, inicialmente utilizadas em MANs e WANS, portam muitas vantagens quanto ao consumo de energia elétrica, dentre outras vantagens, permite que eventualmente a sua aplicação a redes locais, como anteriormente citado, seja portadora de considerável economia de energia. Nesta perspectiva, alguns trabalhos como o de Dias [52] demonstram que sua aplicação como POL já é uma realidade, inclusive em órgãos públicos e empresas brasileiras. Embora ainda precise ficar clara quando estas

vantagens são resultado de uma detalhada análise - como no citado trabalho - e quando não passam de argumentação de alguns vendedores e fabricantes de equipamentos de redes.

Das obras literárias expostas, estabelece-se que para as redes ópticas os estudos de economia de energia adotam frequentemente, assim como em redes de cabeamento metálico, o modelo de máquinas de estados para os componentes e dispositivos para quantificar o consumo da rede e estabelecer estratégias para alcançar a economia de energia. Ou seja, considerando-se com alguma abstração, modela-se matematicamente os estados dos equipamentos quanto ao consumo de energia, e em seguida, quantifica-se o consumo da rede, considerando os dados em transmissão.

Verificou-se que foram propostos modelos matemático analíticos na bibliografia apresentada, o que permite tanto estudos que se apoiem nos modelos matemáticos, como estudos através de simulações, como realizado por alguns autores, para tratar as avaliações de desempenho como a proposta da presente dissertação.

De maneira mais específica, os modelos matemáticos de consumo de energia para as redes PON e POL derivam dos mesmos conceitos que originaram as equações em epígrafe. OU seja, da mesma forma, os equipamentos apresentam um consumo básico em repouso e um consumo variável, com base no tráfego de dados pelas portas ópticas e cabeadas do equipamento. No trabalho de Hirafuji [1] a análise relacionada aos padrões de economia de energia se aplicou à porta óptica das ONUs. Com estas informações, é possível compilar, por exemplo, a Equação 4.1, a qual baseia o consumo em repouso nas informações de consumo de energia por componentes da ONU encontrada em Butt et al. [53].

$$E_{ONU} = T * (C_{b_{ONU}} + C_{b_e} + C_{b_o} + C_{v_e} + C_{v_o}) \quad (2.12)$$

onde E_{ONU} é a energia consumida pela ONU em um intervalo de tempo T , $C_{b_{ONU}}$ é o consumo da ONU não relacionado com suas portas, C_{b_e} e C_{v_e} são respectivamente os consumos básico e variável das portas *ethernet* da ONU e, por fim, C_{b_o} e C_{v_o} respectivamente os consumos da porta óptica, básico e variável com base no tráfego. Ou seja, o mesmo tipo de equação utilizado para as redes BaseT. Considerando o caso de a porta *ethernet* não estar capacitada a utilizar o padrão IEEE 802.3az, então não existe C_{v_e} . C_{v_o} é uma parcela da equação que se desdobra no modelo analítico de Hirafuji et al. [46], o qual no escopo deste trabalho se encontra abstraído com base nos resultados de Hirafuji [1], conforme se verifica no Capítulo 3. Novamente se verifica que o modelo proposto pela Equação 4.1 atende aos objetivos propostos pela pesquisa em tela, havendo equivalência entre este modelo e o proposto pelas referências da literatura abordadas na dissertação.

Na próxima subseção, discorre-se brevemente acerca de modelos matemáticos e algumas simulações antes de se seguir ao próximo capítulo, onde será tratada com mais detalhes a proposta da presente dissertação.

2.2.4 Simuladores em Estudos de Energia em Redes de Transmissão de Dados

Considerando o que foi visto nas subseções anteriores, diversos autores apresentam modelos de consumo de energia para equipamentos de transmissão de dados. Embora alguns estudos acerca de economia de energia possam ser desenvolvidos apenas com o uso de modelos matemáticos, não raro são utilizadas simulações computacionais para corroborar os resultados encontrados, seguindo o proposto por Jain [10]. Nesta subseção se apresenta uma breve revisão da literatura no que concerne a simuladores utilizados em estudos de consumo de energia com transmissão de dados. A literatura exemplifica que há diversas possibilidades de uso de ferramentas de simulação para a realização de pesquisas como a relatada na presente dissertação.

Miletic et al. [54] demonstra em seu artigo como os simuladores de redes, no caso o *NS-3* [11] permitem a simulação em nível de componentes. Como relatado por Miletic et al. [54], alguns simuladores podem ser mais ou menos adequados ao estudo do pesquisador. Contudo, sendo a modelagem por componentes permitida, e estando os modelos de seu comportamento bem definidos, a simulação de eventos torna-se uma boa ferramenta para a comprovação de resultados.

Considerando a simulação como ferramenta de apoio nos estudos de consumo e economia de energia em equipamentos de transmissão de dados, verifica-se que a capacidade de simulação de consumo de energia foi tratada no trabalho de Alsalka and Elmirghani [55] quando do desenvolvimento do simulador *CORNETTO*.

Entretanto, o já citado *NS-3* também tem apresentado bons resultados neste sentido. Orgerie et al. [21] realizou o desenvolvimento de um framework que possibilita exatamente o foco em estudos de consumo de energia em redes cabeadas como as redes BaseT que são objeto da presente dissertação. O *ECOFEN*, já é bastante renomado e reconhecido na academia, além do fato do *NS-3* já encontrar-se também como uma reconhecida e robusta ferramenta de estudos científicos que envolvem redes de dados. O trabalho realizado em [21] consistiu em modelar no *NS-3* máquinas de estados para equipamentos de redes e/ou suas portas, estando ativos quando recebendo ou transmitindo dados e inativos nas situações em contrário, considerando o fator do tempo como meio de controlar as mudanças de estado. Ou seja, se trata, com algumas adaptações, do modelo citado nas Equações 2.4 e 2.5.

O *Omnet++* [51], conforme mencionado, foi o simulador utilizado para o trabalhos de Hirafuji et al. [46]. Com o uso deste muito robusto simulador de eventos discretos foi comprovado que o *watchfull sleep mode* apresenta acentuada economia de energia quando comparado ao *cyclic sleep mode* e ao *doze mode*. Assim como o *NS-3*, o *Omnet++* é muito usado em simulações de eventos em redes de dados.

Ressalta-se, novamente, que as simulações citadas presentes nos diversos trabalhos apresentados acima careceram antes de robustos modelos analíticos relacionados aos componentes dos equipamentos e das topologias das redes, sendo que estes modelos podem permitir se chegar a resultados e conclusões acerca de economia de energia ou mesmo outras métricas relacionadas ao comportamento dos equipamentos de transmissão de dados ou das redes propriamente ditas.

Há de ser destacado, porém, que nem sempre o fato de um simulador ser muito robusto para simulações de rede, ou mesmo que exista modelos de consumo de energia em diversos frameworks desenvolvidos para um simulador, significa que o trabalho de implementar simulações de consumo de energia como as que são foco da presente dissertação se constitua em um trabalho simples. Destacou-se no trabalho anterior que boas simulações dependem de adequados modelos analíticos. Assim, pode ser que um determinado modelo analítico não se encontre desenvolvido para um simulador ou framework. Logo, ao se verificar a adequação de um modelo analítico ao estudo em desenvolvimento, deve-se verificar qual dos simuladores utilizar, com base naquilo que existe já desenvolvido para o simulador e para os frameworks já existentes e o trabalho de adequação e desenvolvimento que será realizado para o experimento necessário.

Considerando o diapasão da presente dissertação, tanto o *NS-3* como o *Omnet++* são simuladores que poderiam atender as necessidades. O *NS-3* possui um framework pronto para as simulações de redes BaseT com e sem uso do 802.3az derivado dos trabalhos de [21], e o *Omnet++* possui praticamente pronto um simulador para as redes POL com e sem mecanismos de economia de energia derivado dos trabalhos de [46]. Ambos os modelos das duas cientistas se aproximam das Equações 2.4 e 2.5.

Analizada amostra da bibliografia relacionada ao tema da dissertação segue-se ao Capítulo 3 para maior conhecimento do problema e da metodologia utilizada para seu tratamento.

Capítulo 3

Metodologia de Avaliação de Desempenho

Após ter sido conhecida um pouco da bibliografia concernente ao tema da presente dissertação, ter se apresentado modelos matemático-analíticos e simuladores nos quais se poderia verificar os resultados obtidos pelos modelos, retomou-se o problema a ser estudado: *Comparar consumos de energia elétrica em redes locais baseadas em meios de transmissão ópticos e metálicos verificando se a substituição da segunda pela primeira apresenta vantagens do ponto de vista energético e financeiro*. O problema foi estudado como objeto de trabalho em um programa de Mestrado Profissional, o que demanda que os resultados sejam aplicáveis em organizações capazes de tomar decisão que utilize tais constatações, no caso, a Presidência da República. Porém, destaca-se novamente, a metodologia utilizada deve ser adequada aos processos de avaliação de desempenho utilizados pela academia, e portanto aplicáveis ao universo da pesquisa acadêmica.

A pesquisa procurou realizar esta verificação para redes locais, uma vez que o problema se origina num cenário de possibilidades de atualização das redes de dados locais das organizações públicas, e as atualizações devem atender a melhorias relacionadas com a preservação ambiental estimulada pelo programa *Esplanada Sustentável* [6]. Os resultados, contudo, podem e devem ser aplicáveis a quaisquer organizações públicas ou privadas.

Com este entendimento, foi tomado o modelo de máquinas de estado para as duas redes em comparação. Conforme demonstrado no capítulo anterior, trata-se de um modelo já consagrado pela literatura e utilizado com êxito pelos trabalhos de Hirafuji et al. [46] e de [21], originando inclusive normas na ITU e frameworks de simulação.

Para as redes com cabeamento metálico, realizou-se, inicialmente, a construção de um modelo analítico baseado no padrão IEEE 802.3az. Tal padrão se encontra implementado como funcionalidade opcional em diversas opções disponíveis de *switches*. As informações

nas quais foram baseados os modelos analíticos se encontram disponíveis em Roebuck [38], Baliga et al. [34], Koomey et al. [35], Christensen et al. [39], e Orgerie et al. [21] bem como em *data sheets* dos equipamentos tomados para inserir parâmetros nos cálculos e nas simulações.

Para entender um pouco os modelos analíticos, e dentro das mesmas técnicas das diversas fontes citadas, as Equações 2.4 e 2.5 podem ser abstraídas para dois estados: Ativo e Inativo, sendo que o estado Ativo de uma porta ou equipamento é visitado quando da transmissão de dados e quando do uso do *refresh* e o inativo no tempo restante.

Deve-se ser destacado, porém, que muitos *switches* disponíveis no mercado não possuem a implementação de funcionalidades que atendam ao preconizado pelo padrão IEEE 802.3az. Assim, deve-se abordar modelos matemáticos para tais modelos de *switches*, inclusive em virtude de a Presidência da República ser uma organização que dispõe deste tipo de equipamento. No entanto, este modelo matemático não implica no uso de equações diferentes das Equações 2.4 e 2.5, pois ocorre apenas que ao invés de, por exemplo, estados ativo e inativo para uma porta ou *switch*, haverá apenas o estado ativo, o que por sua vez implica que a quantidade de dados trafegados passa a ser indiferente.

Em adição, o comportamento de o equipamento ficar o tempo todo com suas portas em estado ativo pode ser obtido com a não opção de uso do padrão IEEE 802.3az. Desta forma, os parâmetros dos *data sheets* dos equipamentos com o padrão poderiam ser usados para redes com e sem recurso de economia de energia.

Quanto às redes ópticas, o citado trabalho de Hirafuji et al. [46] se baseou em normas da ITU [47, 56, 57], sendo portanto, a metodologia utilizada no artigo em tela aplicável ao universo da presente dissertação.

O padrão *Watchfull Sleep Mode* ainda não se encontra largamente implementado em dispositivos à venda no mercado, ao contrário dos padrões *Cyclic Sleep* e *Doze Mode* que, por exemplo, encontram-se como mecanismos de redução de consumo de energia em *OLTs* Cisco ME4601 CISCO [58]. Entretanto, como o citado trabalho de Hirafuji et al. [46] nos permitiu obter resultados para o *Watchfull Sleep Mode*, e o padrão muito em breve pode estar disponível no mercado, resultados gerados por este padrão se encontram presentes na dissertação.

Igualmente ao que ocorre em redes de cabeamento metálico, é possível encontrar equipamentos para redes ópticas que não implementam funcionalidades de economia de energia como os equipamentos citados no parágrafo anterior. Atentar que o questionamento do problema em estudo procura saber se a implementação de redes ópticas POL é capaz de gerar economia de energia quando substituindo redes cabeadas. Considerando que tais redes ópticas poderiam ser implementadas com equipamentos que não utilizem padrões de redução de consumo de energia, deve-se obter comparações tanto por modelos analí-

ticos, como por simulações ou medições, também para redes ópticas sem mecanismos de economia de energia em seus dispositivos. Baliga et al. [34], Christensen et al. [39], Dias [52], Koomey et al. [35] e Hirafuji [1] são fontes que complementam os cálculos realizados por meio dos modelos analíticos e simulações para as redes ópticas.

A relação do estado ativo dos equipamentos com o volume de tráfego se baseou nos trabalhos de Orgerie et al. [21] e Hirafuji [1]. Tendo como premissa, ainda, a sucessão de eventos para cada porta de um equipamento de rede, e com base no apontado em todas as equações anteriores, obteve-se um modelo analítico análogo à Equação 2.10. considerando, entretanto, os referidos experimentos de Orgerie et al. [21] e Hirafuji [1], resultando na Equação 4.1 para cada equipamento, seja da rede BaseT, seja da rede POL, à seguir:

$$E_{eq} = T * (C_{beq} + C_{bp1} + C_{bp2} + \dots + C_{bpn}) + N_{bytes_{p1}} * E_{byte_{p1}} + N_{bytes_{p2}} * E_{byte_{p2}} + \dots + N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}} \quad (3.1)$$

onde T é o tempo considerado, C_{beq} a energia consumida pelo equipamento em repouso, C_{bpn} a energia consumida pela *enésima* porta em repouso, $N_{bytes_{pn}}$ a quantidade de *bytes* que trafegam na *enésima* porta durante o período considerado e $E_{byte_{pn}}$ a energia consumida para cada byte trafegado pela *enésima* porta. C_{bpn} e $E_{byte_{pn}}$ variam de acordo com o tipo de porta (BaseT ou POL, banda e equipamento). A energia consumida pela rede consistiu no somatório simples das energias consumidas pelos equipamentos utilizados.

Quanto aos parâmetros, são características dos equipamentos utilizados:

- Redes BaseT (informações compiladas na Tabela 3.1):
 - Switch Core Cisco Nexus 7000 F Series 32 Ports 1 and 10G Popoola and Prangono [59], no qual as portas de 10Gb/s consomem em estado ativo 10 W (watt) e em estado idle 1 W. O consumo por byte é de 7,2 nJ*s (nanoJoules * s). O consumo básico deste equipamento é de 385 W.
 - Switch Core/Acesso Cisco Catalyst 2960-L 48-Ports 1G/ 4 Ports 10G Cisco Systems [60]. As portas de 10Gb/s consomem em estado ativo 3,76 W (watt) e em estado idle 0,376 W. As portas de 1Gb/s consomem em estado ativo 0,21388 W (watt) e em estado idle 0,021388 W. O consumo por byte é, respectivamente para as portas de 10 e 1Gb/s de 2,7 e 1,5 nJ*s (nanoJoules * s). O consumo básico deste equipamento é de 47,63 W.
- Redes POL (informações compiladas na Tabela 3.2):
 - OLT concentrador óptico standalone GPON FK-OLT-G8S da marca Furukawa. Consumo de 70W. Trata-se do equipamento utilizado em Dias [52].

- ONU AN5506-04B Fiberhome com consumo de aproximadamente 8 W. Para o consumo da porta óptica considerou-se as proporções de consumo de componentes de ONUs conforme Butt et al. [53] com base no consumo por porta óptica catalogado em Lambert et al. [61], 1,8 W em estado ativo.

Tabela 3.1: Parâmetros rede BaseT - retirados da literatura, características semelhantes a de equipamentos em utilização na Presidência da República.

Equipamento /Consumo /Porta	Consumo Básico Chassi	Consumo porta ativa		Consumo porta em "idle"		Consumo por byte	
		10 Gb/s	1 Gb/s	10 Gb/s	1 Gb/s	10 Gb/s	1 Gb/s
Switch Core	385 W	10 W	-	1 W	-	7,2 nW	-
Switch de Acesso	47,63 W	3,76 W	0,214 W	0,376 W	0,0214	2,7 nW	1,5 nW

Tabela 3.2: Parâmetros rede POL - retirados da literatura, características de equipamentos utilizados em POL de alguns órgãos públicos.

Equipamento	Consumo básico chassi	Consumo porta óptica ativa
OLT	70 W	-
ONU	8 W	1,8 W

Para as redes BaseT os valores adotados de consumo para as portas em *idle*, em relação às mesmas portas em estado ativo foram baseadas em Taich et al. [62] e Christensen et al. [39].

A topologia adotada para as redes BaseT é a apresentada na Figura 3.1. Na referida Figura, *sw* é um *switch* de acesso e *usu* é um usuário ou cliente conectado ao *switch* de acesso. O *delay* entre o *switch core* e o servidor é de 20 ms (milissegundos) e os demais são de 10 ms. Todas as portas do *switch core* em utilização são de 10 Gb/s (gigabits por segundo). As portas dos demais *switches* são de 1Gb/s quando se comunicam com o usuário e de 10Gb/s quando se comunicam com o *switch core*. Os clientes são distribuídos na rede sempre preenchendo completamente um *switch* antes de passar os eventuais clientes restantes ao *switch* seguinte. Esta escolha foi feita com base em um princípio de aproveitar as capacidades de cada equipamento ao máximo no sentido de que os consumos básicos dos *switches* em repouso são muito elevados em relação ao consumo variável relacionado ao tráfego de dados nos equipamentos em tela. Este mesmo princípio é adotado para as ONUs das redes POL analisadas. Em adição, tanto a ideia de se aproveitar bem as capacidades dos equipamentos como a topologia adotada foram escolhas que derivam de similaridade com a rede de dados hoje existente na Presidência da República.

As redes POL, por sua vez, para o desenvolvimento da presente dissertação, possuem a topologia apresentada na Figura 3.2. Todos os *delays* de interligações entre os nós da

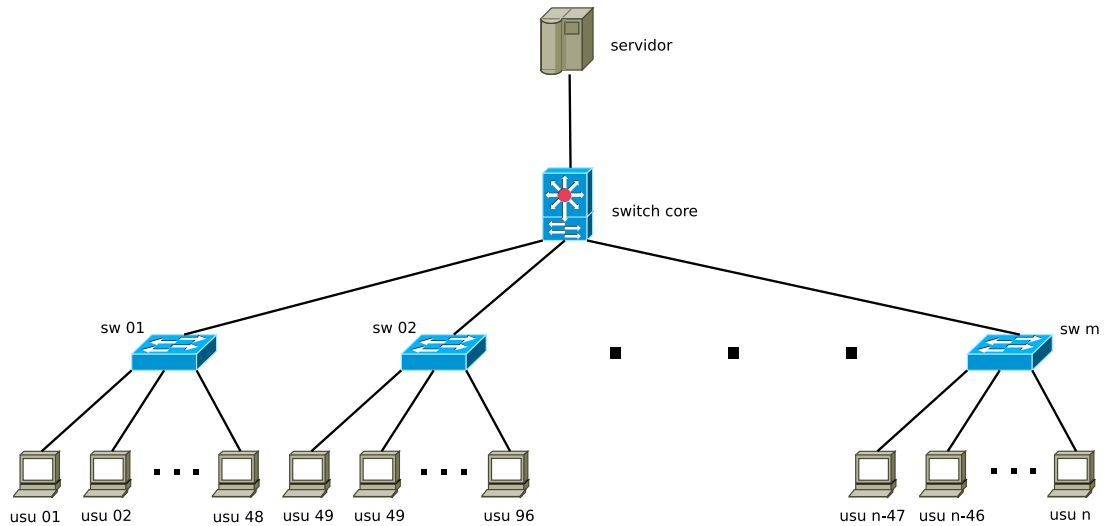


Figura 3.1: Topologia das redes BaseT

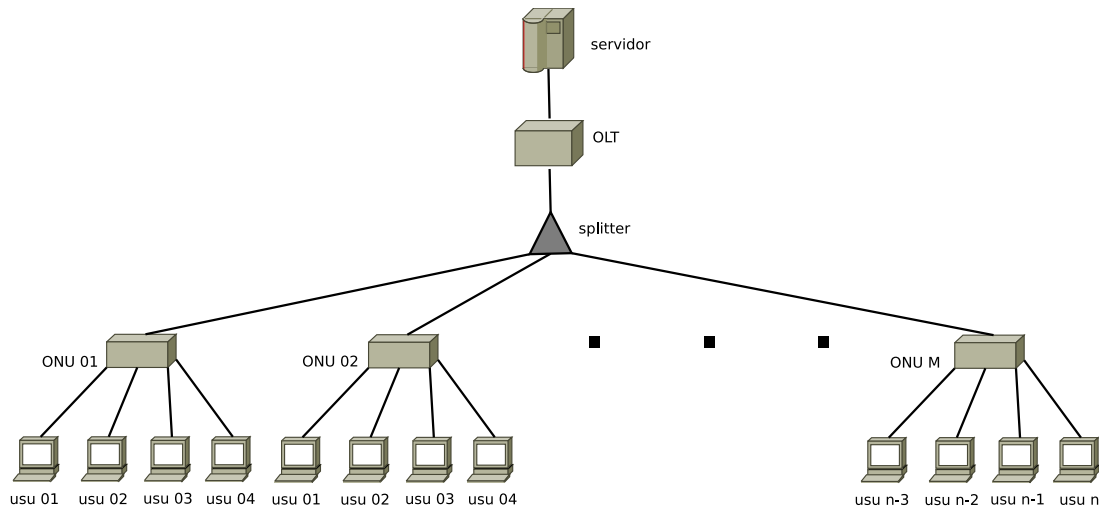


Figura 3.2: Topologia das redes POL

rede são de 2 ms (utilizou-se o delay relativamente alto para uma rede POL em virtude de a rede local da Presidência da República se estender por até 10 quilômetros em alguns enlaces - ocasiões onde se usa links de fibra óptica interligadas a elementos *ethernet*). O *throughput* da rede segue as especificações do padrão G.984.1 ITU-T [57]. Novamente, a escolha pela topologia derivou de projetos já propostos para a implementação de uma rede POL para a Presidência da República.

O tempo de atividade e inatividade de cada porta em cada equipamento deriva do volume de dados trafegados. Quanto mais dados trafegados, mais tempo a máquina permanece com as portas utilizadas em estado ativo. Na ausência de dados, as portas em utilização permanecem em *idle*. O consumo máximo e mínimo para uma determinada topologia de rede, então, é facilmente obtido com estas considerações. O consumo com

determinados volumes de dados deriva da energia gasta para trafegar este volume. Como resultado final seria possível obter o tempo em estado ativo, que também varia de acordo com os protocolos de entrada em estados *idle*. Entretanto visualizar o intervalo específico no qual uma porta permaneceu em estado ativo não é o foco deste estudo, sendo importante do ponto de vista do mecanismo interno das simulações realizadas, mas não do ponto de vista dos resultados apresentados em si. O estudo analítico se concentrou em mostrar o consumo máximo e mínimo de cada tipo de rede nos termos apresentados no presente parágrafo.

Quanto às simulações, a questão do tempo em estado ativo já se encontra tratada para o simulador apresentado em Orgerie et al. [21]. Assim para as redes BaseT não foi preciso verificar a carga de energia consumida por bit ou byte, salvo para inserir os parâmetros de simulação.

Para as redes POL, considerou-se os resultados de economia obtidos por Hirafuji [1]. Os resultados apresentados no aludido trabalho permitiram o desenvolvimento de um modelo de energia que se baseia no consumo de energia da ONU e no consumo de energia da porta óptica quando acionados mecanismos de economia de energia, considerando o volume de dados trafegados. Os resultados apresentados permitiram verificar que utilizando-se *Cyclic Sleep Mode* ou *Doze Mode* se obteria valores de consumo ou economia de energia muito próximos. O mesmo artigo nos permitiu encontrar meios de simular e calcular o consumo de energia caso fosse utilizado o *Watchfull Sleep Mode*. Esse mecanismo foi utilizado tanto nas simulações quanto no cálculo analítico.

Tanto para as redes BaseT, como para as redes POL, foram considerados para o manejo de economia de energia apenas mecanismos já padronizados. Embora o *Watchfull Sleep Mode* não esteja implementado nos equipamentos encontrados no mercado, já se encontra padronizado, e recomenda-se a sua implementação em futuro iminente. Outros padrões, BaseT ou POL que se encontrem propostos, mas não padronizados, não foram objetos da pesquisa em tela. Considerou-se, portanto, apenas mecanismos padronizados, embora seja possível averiguar na literatura inúmeras propostas de mecanismos e padrões.

Assumi-se nos cálculos e simulações que os equipamentos seriam capazes de prover os mecanismos de economia de energia citados. Contudo, conforme já apresentado ao longo desta dissertação, muitos equipamentos não apresentam tal capacidade e parte dos equipamentos citados podem não apresentar a aludida capacidade.

Desta forma quanto ao objetivo específico *modelar analiticamente os consumos de energia de cada uma das redes em comparação* realizou-se a modelagem analítica e conjuntos de simulações, para ao menos 4 tipos de redes diferentes:

- LAN *BAseT* **sem** utilização do padrão IEEE 802.3az;
- LAN *BAseT* **com** utilização do padrão IEEE 802.3az;

- POL **sem** utilização de *Cyclic Sleep Mode*, *Doze Mode* e *Watchfull Sleep Mode*; e
- POL **com** utilização de *Cyclic Sleep Mode*, *Doze Mode* e *Watchfull Sleep Mode*;

Tanto nas simulações quanto no estudo analítico considerou-se cenários com e sem refrigeração de equipamentos, conforme mencionado anteriormente.

É importante frisar, porém, os efeitos que os fatores das Equações 2.4 e 2.5 tem no resultado. Destacando, inicialmente, o termo P_r , que se refere ao consumo de energia com refrigeração. Segundo Baliga et al. [34] e Koomey et al. [35] pode-se considerar que para cada *Watt* consumido no funcionamento de equipamento, outro *Watt* é consumido com refrigeração para equipamentos que necessitam de resfriamento. Para a presente dissertação adotou-se a apresentação de resultados não considerando o consumo com refrigeração, e considerando o consumo com refrigeração. É importante frisar que muitos trabalhos da área de Green IT e de economia de energia, como Zhang et al. [63, 64], Koomey et al. [35], Koomey [65] tem trabalhado com ideias que reduzem o consumo de energia dispendido com refrigeração por meio das mais variadas técnicas. Estes esforços conduzem a um futuro no qual o dispêndio de energia com refrigeração será muito reduzido, o que conduziu a pesquisa a representar a possibilidade de uso de redes cabeadas onde tal consumo é mínimo ou inexistente.

Quanto às redes POL, verificou-se que a literatura é rica em citar a dispensa de refrigeração por parte das ONUs, o que pode ser exemplificado nos trabalhos de Zheng and Habibi [66], [67], Ennser et al. [68] e Dias [52]. Assim, em nenhum caso considerou-se a refrigeração para as ONUs utilizadas. Para a OLT, não se considerou padrões de economia de energia com base na atividade das portas pois a literatura utilizada pouco trabalha esta questão. Ademais, conforme Hirafuji et al. [46] é papel deste nó da rede PON auxiliar o controle da entrada das ONUs em estados *idle*. Em adição, com o aumento da rede este equipamento tende a ficar cada vez mais tempo em atividade, em oposição às capacidades das centenas de ONUs de permanecerem em estados de inatividade.

Compilou-se os resultados das Equações 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 nos diferentes tipos de rede e tomando redes com 32, 128 e 256 nós finais. Os resultados foram obtidos, conforme citado anteriormente, para redes BaseT x POL, com e sem uso de refrigeração. Para as redes POL se considerou que cada ONU atende a até 4 clientes ou usuários. Para as redes BaseT considerou-se apenas um usuário ou cliente por porta de 1 Gb/s nos *switches* de acesso. No caso do estudo matemático-analítico se tomou casos da rede com carga que mantivesse o equipamento sempre com as portas utilizadas em estado ativo, ou inverso, ou seja, com as portas sempre em *idle*, logo, com ausência de tráfego. Analisou-se então as curvas geradas quanto à inclinação para obter mais informações comportamentais, uma vez que os equipamentos utilizados como base dos parâmetros, bem como os tamanhos e topologias das redes em análise podem ser modificados. Como exemplo, um *switch core* de

grande porte que tem um consumo básico de 385 W pode ser substituído em alguns casos por outro com consumo básico de cerca de 50 W, e neste caso, a rede teria um reduzido consumo básico de energia, podendo ser mais vantajosa para atender a determinados volumes de usuários.

Considerando uma regressão linear aproximada (considerando pontos para 32 e para 256 usuários) para as curvas obtidas por meio dos modelos analíticos, se tornou possível verificar, aproximadamente, o ponto de encontro de curvas de consumo de energia por volume de usuários, e assim comparar até uma rede aparentemente em desvantagem manteria o consumo de energia maior que a rede concorrente. Tal aproximação foi realizada tanto para os cálculos analíticos como para os resultados obtidos nas simulações. Destaca-se que já se verificava a este ponto da pesquisa que as curvas que consideravam o consumo com refrigeração (de 1 *watt* consumido com refrigeração para cada *watt* consumido pelo funcionamento dos equipamentos de rede) representavam situações onde o consumo de energia era demasiado elevado para que houvesse qualquer possibilidade de a rede concorrente ser desvantajosa. Em virtude do que preconiza a obra de Jain [10], os resultados de uma avaliação de desempenho, que é no que consiste o experimento proposto na dissertação, devem ser confirmados por um método adicional. Jain [10] propõe que sejam utilizados dois dentre três métodos presentes em sua obra, quais sejam: medições, modelos analíticos e simulações. Assim, o experimento proposto precisa ser acompanhado por um segundo método que confirme os resultados obtidos analiticamente.

Por simplicidade, se poderia realizar medições. As condições necessárias para tal atividade é que se tivesse acesso a equipamentos de redes de dados BaseT, com e sem o uso da funcionalidade IEEE 802.3az e equipamentos PON com e sem o uso das funcionalidades do *Cyclic Sleep Mode* ou do *Doze Mode*. Se deveria ainda haver uma estrutura onde fosse possível medir o consumo de energia destes equipamentos nas diferentes situações. Não se conseguiu obter acesso a estes equipamentos durante o período de pesquisa nas condições necessárias.

Assim, o resultado obtido no estudo analítico somente poderia ser confirmado com base na citada simulação computacional como as realizadas por Hirafuji [1], que utilizou o simulador *Omnet++* [51] para estudar a energia consumida em redes que utilizassem os padrões *cyclic sleep*, *doze mode* e *watchfull sleep mode*. Tal requisito ocasionou a necessidade do objetivo específico *realizar simulações das redes comparadas a fim de obter o comportamento do consumo de energia*, e com isso seriam atendidos por completo os objetivos de uma correta avaliação de desempenho.

Conforme citado ao final do capítulo anterior, tanto o *NS-3* como o *Omnet++* são simuladores que poderiam atender às necessidades da pesquisa em tela. O *NS-3* possui um *framework* pronto para as simulações de redes BaseT com e sem uso do 802.3az

derivado dos trabalhos de Orgerie et al. [21], e o *Omnet++* possui praticamente pronto um simulador para as redes POL com e sem mecanismos de economia de energia derivado dos trabalhos de Hirafuji et al. [46]. E, destacando novamente, ambos os modelos se aproximam, ou possuem funcionamento semelhante ao das Equações 2.4 e 2.5.

Inicialmente, em virtude de os modelos analíticos serem extremamente simples, consistindo basicamente em equações de soma de energia ao longo do tempo, se aventou a possibilidade de até mesmo se utilizar os dois simuladores.

Utilizar simuladores separados seria vantajoso por haver poucas adaptações a serem realizadas nos modelos de [21] e de [46]. No entanto, trata-se de ambientes diferentes. Segundo evidenciado por Sharma and Sharma [69], caso se deseje comparar dois modelos dentro de um simulador (*Omnet* ou *NS-3*) os resultados serão semelhantes, independentemente do simulador. No entanto, caso se queira comparar resultados (valores) obtidos para um mesmo experimento, os números serão ligeiramente diferentes entre os simuladores. Assim, esta diferença de ambientes não pôde ser descartada.

Logo, deveria haver uma escolha entre *Omnet* e *NS-3*. Para o *Omnet*, havia disponível praticamente completo o modelo para a simulação de POL, devendo ser desenvolvido todo um modelo de simulação para as redes BaseT com adequados modelos de consumo de energia. Embora houvesse modelo de energia para o *Omnet*, e até mesmo algumas tentativas de implementação do IEEE 802.3az, nenhum destes modelos se mostrou adequado para as adaptações dentro do tempo e dos recursos disponíveis.

Por outro lado, considerando o *NS-3*, já havia a renomada implementação de redes cabeadas BaseT com modelos de consumo de energia, o *ECOFEN* de Orgerie et al. [21]. Para a aplicação deste modelo foram utilizados os parâmetros apresentados em epígrafe, não havendo necessidade de alterações substanciais, salvo totalizações globais de valores.

Restaria, portanto, verificar a possibilidade de desenvolvimento de redes ópticas com inclusão de consumo de energia, derivada da mudança de estados e/ou tráfego de dados, em consonância com as Equações 2.4 e 2.5.

Foi encontrada a implementação de redes ópticas passivas de Wu et al. [70]. Este modelo se apresentava academicamente correto como simulador de redes ópticas passivas. Trata-se de um modelo de XG-PON, que em geral implementa um simulador de redes ópticas de acordo com as especificações encontradas em ITU-T [56]. Seria preciso adaptar esta simulação ao padrão G-PON (ITU-T [57]). Para tanto, trabalhou-se basicamente nas especificações do *frame* e do *throughput* da rede.

O modelo também não continha, até então, um cálculo de consumo de energia ou mesmo uma definição clara de máquinas de estados para os nós ou componentes. A solução para tal problema se baseou mais uma vez nos resultados dos trabalhos de Hirafuji et al. [46]. O simulador de Wu et al. [70] continha um contador de dados trafegados.

Com base neste acumulador se desenvolveu o calculador de energia economizada na porta óptica da ONU considerando os resultados do experimento de Hirafuji et al. [46], onde se apresenta modelos matemáticos do decaimento da economia de energia à medida em que se aumenta o tráfego. Este calculador, desenvolvido com poucas linhas de código, forneceu os resultados para o consumo de energia da ONU sem e com mecanismos de economia de energia (*Cyclic Sleep Mode*, *Doze Mode* e *Watchfull Sleep Mode*).

As simulações para as redes em comparação foram realizadas, assim como os cálculos analíticos, para as quantidades de 32, 128 e 256 clientes, com as mesmas disposições e topologias e parâmetros considerados no modelo matemático.

Para o tráfego se utilizou 3 aplicações diferentes rodando nos clientes, quais sejam:

- tráfego UDP (do inglês *User Datagram Protocol* - protocolo da camada de transporte da rede) em aplicação *UDP echo*; pacotes entre 64 e 1500 bytes (distribuição uniforme). Aqui se buscou reproduzir, de forma aproximada, o experimento realizado por Hirafuji [1]. Esta forma de geração de tráfego é amplamente utilizada e presente na literatura de análise de desempenho com a métrica de consumo de energia. O intervalo entre os pacotes foi calculado com base no tamanho dos pacotes e no *bit rate* da comunicação entre o nó cliente e o mecanismo de comunicação (switch de acesso ou ONU) utilizando a relação :

$$I = 8 * 1000 * T / \text{throughput} \quad (3.2)$$

onde I é o intervalo e T é o tamanho selecionado. A aplicação envia pacotes todo o tempo da simulação (10 segundos).

- tráfego VoIP baseado na aplicação VoIP de da Mata [71]. A aplicação considerou a possibilidade de estabelecimento ou não da chamada, a qual poderia durar até 8 segundos e poderia ser iniciada nos primeiros dois segundos de simulação. A simulação também durou 10 segundos. A escolha pela aplicação VoIP está relacionada ao fato de que a rede de dados da Presidência da República é muito utilizada para o provimento de chamadas telefônicas VoIP. Devido a características intrínsecas do VoIP, embora a aplicação seja UDP, o tráfego gerado tende a ser menor que o tráfego UDP da aplicação *UDP echo*, tendendo a um consumo de energia menor.
- tráfego HTTP 1.1 gerado pela aplicação HTTP de da Mata [72]. Os clientes poderiam ou não requisitar pacotes do servidor e estas requisições poderiam se diferenciar em tamanhos e quantidades. Cumpre destacar que um tráfego HTTP, na camada de transporte da rede trabalha com fluxos TCP (do inglês *Transport Control Protocol*.

A diferença para o UDP é que o TCP é orientado à conexão. Novamente, a escolha por esta aplicação está relacionada com o fato de a Presidência da República utilizar a rede de dados com um alto tráfego relacionado a sistemas que utilizam o protocolo HTTP 1.1. Pelas características do protocolo, a depender do tempo de simulação, tenderia a ser a aplicação com maior volume relativo de dados e, portanto, a de maior consumo de energia.

Para cada tamanho de rede e para cada aplicação foram utilizadas 5 sementes, o que totalizou 90 simulações. Considerando que todas as simulações seriam rodadas com uma única aplicação, a tendência é que os resultados ficassem mais próximos da curva mínima obtida pelo modelo analítico, especialmente na aplicação VoIP devido ao reduzido volume dos pacotes (60 bytes na camada de aplicação).

Os *overheads* ou cabeçalhos acrescentados aos pacotes nas redes seriam diferentes o que faria com que o volume de dados nas camadas mais baixas fosse essencialmente diferente. No entanto, as aplicações possuem características semelhantes na camada de aplicação para os clientes, o que evidencia que mesmo com volume de dados diferentes nas camadas inferiores, os clientes estariam realizando atividades dentro de um certo padrão de comportamento, validando os resultados comparativos.

Apresenta-se, no Apêndice A, exemplo de simulação das redes metálicas. No Apêndice B, são apresentados alguns dos módulos da implementação POL onde se realizou alterações (XG-PON para PON no simulador de Wu et al. [70]) e de onde se coleta as variáveis de contagem de dados e de pacotes. No Apêndice C se apresenta um exemplo do programa principal de simulação da rede POL.

Passa-se agora ao Capítulo 4, onde se apresenta os resultados obtidos pela pesquisa e a análise que permite confirmar ou rejeitar a hipótese, bem como concluir se a substituição de redes BaseT por redes POL permite, de fato, acentuada economia de energia e por consequência a viabilidade de substituição.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da pesquisa. A organização se baseia no fornecimento dos resultados obtidos por meio dos modelos analíticos e por meio das simulações respectivamente. Cumpre destacar novamente que os modelos analíticos e as simulações consideraram 4 tipos de redes, a saber:

- LAN *BAsE*T **sem** utilização do padrão IEEE 802.3az;
- LAN *BAsE*T **com** utilização do padrão IEEE 802.3az;
- POL **sem** utilização de *Cyclic Sleep Mode*, *Doze Mode* e *Watchfull Sleep Mode*; e
- POL **com** utilização de *Cyclic Sleep Mode*, *Doze Mode* e *Watchfull Sleep Mode*;

A primeira divisão de grupos de resultados se refere a resultados obtidos por modelos analíticos e resultados obtidos em simulações. Os resultados são apresentados agrupando os obtidos para equipamentos com e sem formas de ser economizar energia por utilização de estados *sleep*. Quando possível e necessário dispõe-se em única figura diversas curvas de consumo para concretizar-se a avaliação da vantajosidade de um ou outro tipo de rede, com ou sem mecanismos de funções *sleep*.

Recorda-se que os resultados obtidos por modelos analíticos e os resultados obtidos por meio de simulações foram baseados nos mesmos tipos de equipamentos e dados informados no Capítulo 3. Outro dado importante a ser lembrado é que por simplicidade, os resultados apresentados para os modelos analíticos se concentram nos modos de operação de máximo consumo de energia de uma rede e de mínimo consumo de energia, ou seja, de tráfego contínuo de dados e de ausência de tráfego de dados na rede, situação na qual as portas em conexão se encontram em *idle*. As simulações se concentram em situações intermediárias, ou seja, momentos de tráfego e momentos de inatividade, sendo que espera-se que estas curvas se aproximassem das curvas de mínimo consumo, uma vez que utilizou-se apenas uma aplicação por vez em cada simulação.

A sigla LPI (do inglês *Low Power Idle*), representa baixo consumo em estados de inatividade, relacionado comumente ao padrão IEEE 802.3az, é apresentado com frequência nos resultados a seguir, relacionado com redes onde a capacidade de manejo para economia de energia está disponível.

Retoma-se, ainda, que o **objetivo** geral da dissertação foi: *Comparar consumos de energia elétrica em redes locais baseadas em meios de transmissão metálicos (Redes BaseT) e em meios de transmissão ópticos (Redes POL), verificando se a adoção de Redes POL em substituição a Redes BaseT apresentaria vantagens segundo métricas de consumo de energia e por consequência de valores financeiros derivados da projeção de consumo de energia.*

Por fim, a **hipótese** suscitada ao início dos trabalhos foi a de que *a troca de tecnologia BaseT por POL não é inequivocamente vantajosa em termos energéticos*. O resultado de economizar ou não energia depende das características dos equipamentos empregados nas redes BaseT e POL, empregando a última um grande volume de equipamentos ONUs, e portanto a vantagem da rede POL não consiste em um fato absoluto e inequívoco em relação à métrica de economia de energia.

4.1 Resultados Obtidos por Modelos Analíticos

Considerando todas as premissas descritas no Capítulo 3, os valores dos cálculos resultaram nas curvas de consumo de energia em função do número de usuários dispostas na Figura 4.1.

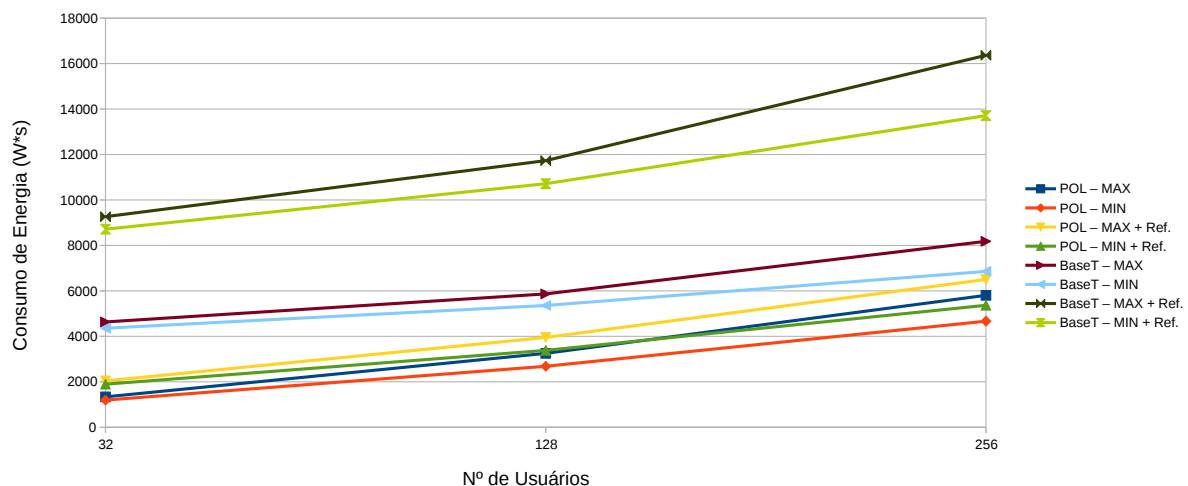


Figura 4.1: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL.

Com base nos resultados da Figura 4.1 foi possível observar que, de fato, haveria situações onde a substituição de redes BaseT por redes POL poderia ser vantajosa quanto ao consumo de energia elétrica. Considerando um tempo de medição de dez segundos, se observa que em praticamente todas as situações, com os parâmetros adotados, as redes POL apresentaram um consumo menor de energia elétrica. O resultado se manteve para todos os tamanhos de rede apresentados na referida Figura 4.1.

Há alguns aspectos interessantes a serem considerados acerca dos resultados. Nas situações em que se comparou redes com consumo de refrigeração, as redes BaseT se apresentaram extremamente desvantajosas. Tal fato já era esperado, de certa forma, pois as ONUs empregadas nas redes POL não precisam ser refrigeradas, o que concede certa vantagem a este tipo de rede com relação à economia de energia elétrica.

Outro fator que tendeu a favorecer as redes POL foi o fato de que em redes corporativas, o *switch core* tende a ser de porte elevado, o que por sua vez tende a consumir uma grande quantidade de energia apenas em consumo básico.

Porém é preciso observar que estes elementos não são suficientes para negar a hipótese da dissertação. É possível observar que as curvas relacionadas às redes POL tenderam a apresentar coeficientes angulares maiores que as curvas relacionadas às redes BaseT, especialmente nos casos nos quais não se considerou o efeito da energia consumida com refrigeração dos equipamentos. Com o objetivo de estudar as questões consideradas nos dois parágrafos anteriores, considerou-se as curvas com ponto de origem equivalente. Assim é possível verificar o desvio provocado pelo consumo básico dos equipamentos que compõem os nós centrais da rede, e verifica-se melhor o efeito da refrigeração sobre o coeficiente angular das curvas. O resultado é apresentado na Figura 4.2 à seguir.

As curvas relacionadas a redes BaseT, incluindo a de consumo máximo sem refrigeração, tenderam a apresentar os menores coeficientes angulares. É importante destacar que em redes reais, com um número reduzido de *switches* de acesso, a utilização de refrigeração pode ser dispensável.

É evidente que se o equipamento central da rede BaseT fosse um *switch* de porte um pouco menor, o que seria adequado se a rede tivesse um número de nós finais ou de usuários como os dos tamanhos especificados, haveria menor consumo de energia em uma rede BaseT, mesmo sem o mecanismo de redução de consumo de energia provido pelo padrão IEEE 802.3az.

Considerando, porém, que se trata da rede corporativa da Presidência da República, na qual são empregados equipamentos de grande porte, como os descritos no Capítulo 3, também seria preciso cautela na negação da hipótese. Inicialmente, os coeficientes angulares das curvas, menores para redes BaseT, demonstram que caso o consumo com refrigeração fosse reduzido, então as redes BaseT teriam suas curvas de consumo de energia

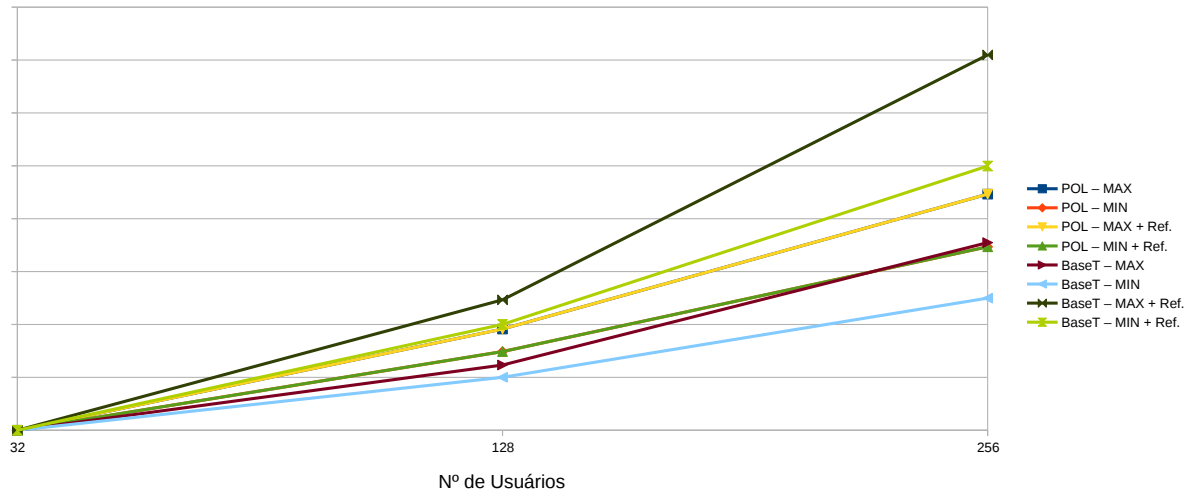


Figura 4.2: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.

cruzando as curvas de consumo de energia das redes POL em um ponto de volume de usuários a ser calculado. Caso esse volume de nós finais/usuários fosse menor que o volume real de usuários e nós finais na rede da Presidência da República à época da eventual substituição, então a rede BaseT seria mais vantajosa com relação à métrica da comparação. A utilização do padrão 802.3az tenderia a confirmar esta melhor economia de energia elétrica por parte da rede BaseT.

Entretanto, em redes que demandam refrigeração nos patamares considerados pela literatura utilizada, ou seja, 1 *watt* gasto com refrigeração para cada *watt* (1 x 1) consumido com os equipamentos, então a hipótese estaria negada. Tal fato, contudo, não impede que a equipe técnica da Presidência da República busque alternativas para a redução de tal consumo de energia, sem que necessariamente passe por uma substituição da tecnologia de rede BaseT por rede POL.

A Figura 4.2 deixa claro, porém, que se o equipamento componente do nó central fosse mais eficiente em consumo de energia que o empregado no cálculo, então a confirmação da hipótese ocorreria novamente.

A aplicação do modelo analítico para o caso real da Presidência da República demandaria a determinação, ainda que por aproximação, do ponto de encontro de curvas referentes aos consumos das redes em comparação. As curvas de consumo máximo são as mais adequadas para tal finalidade. Em epígrafe, informou-se que para as curvas com consumo de refrigeração 1 x 1, a hipótese está negada, ao menos para as situações calculadas. Então verificou-se para as curvas sem refrigeração (que podem ser muito próximas a situações de consumo energético com refrigeração reduzido ou alimentado por fontes

alternativas).

Conforme indicado no Capítulo 3, utilizou-se uma simples regressão linear (as curvas encontram um crescimento quase constante com base nos consumos básicos de energia das ONUs e dos *switches*) com base nos pontos obtidos para as curvas, por exemplo, (32; 1337,34) e (256; 5802,4) para a curva de máximo consumo para a rede POL sem refrigeração e (32; 4632,34) e (256; 8180,93) para a rede BaseT em máximo consumo sem refrigeração. Considerando a regressão linear, chega-se a um resultado aproximado de que os consumos de energia estariam equivalentes quando a rede alcançasse 838 usuários, aproximadamente. Este comportamento está demonstrado no gráfico da Figura 4.3.

A quantidade de usuários para a qual as referidas curvas se encontram está muito abaixo dos 12.000 nós finais existentes na rede da Presidência da República. Contudo, em cada uma das referidas redes, quando em provimento de serviços a um elevado número de usuários, seria necessário acrescentar novos elementos ou camadas (OLT nas redes POL e *switches* nas redes baseT) quando fosse atingida a máxima capacidade de atendimento do nó central. Para um seguimento da rede ligado a um *switch core* que consegue suportar até 32 *switches* de acesso, o que culmina num valor na casa de 1500 usuários, encontra-se a situação de vantajosidade para a rede BaseT quanto ao consumo de energia. A continuidade desta vantagem dependeria da maneira como fosse incrementada a capacidade de atendimento da rede (novas camadas, novos modelos de *switches*, novos *switches core*, etc.). Por exemplo, a adição de alguns poucos *switches* compondo uma agregação em camadas poderia ser mais eficiente que a adição de um novo *switch core* e manter a vantagem da rede BaseT em relação a um POL, ambas atendendo um volume de 2056 usuários, quando apenas o consumo básico das ONUs nos mesmos 10 segundos seria superior a 31kJ.

Cumprе salientar, novamente, que tal situação desconsiderou o consumo com refrigeração, e desconsiderou a capacidade de economia de energia eventualmente aplicada ao equipamentos de rede. Entretanto, tal situação seria plausível para determinados porte de rede onde a agregação de switches, devido ao tamanho da rede e devido à disposição dos equipamentos fosse eventualmente desnecessária, sendo também desnecessário refrigerar os equipamentos por diversas razões, validando a hipótese novamente.

Este comportamento de elevada inclinação para as curvas das redes POL está relacionado com o elevado número de ONUs e a capacidade de usuários atendidos por cada uma destas ONUs. Uma ONU está atendendo, no caso verificado, apenas 4 usuários, consumindo aproximadamente 6,1 W no melhor caso. Para o atendimento de 48 usuários, um *switch* de acesso está consumindo 47,63 W. Ou seja, na rede BaseT há um consumo básico aproximado de 1 W por usuário no mínimo e na rede POL de aproximadamente 1,5 W no mínimo, explicando com clareza o comportamento verificado para as curvas das

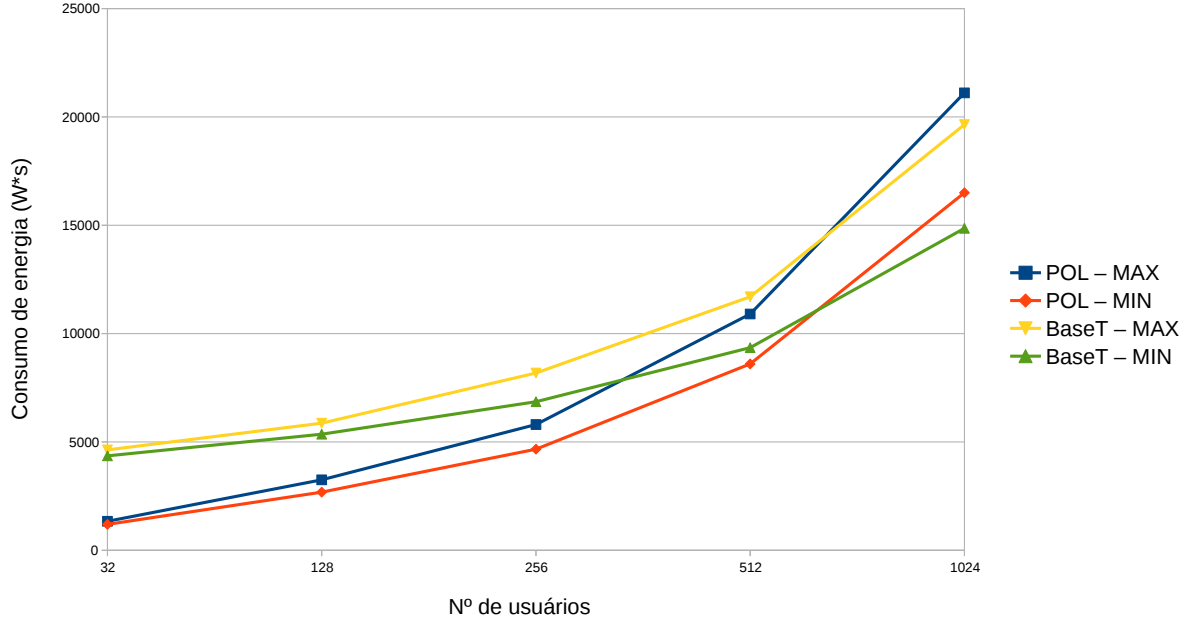


Figura 4.3: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com taxa de ocupação máxima do tráfego e com ausência de tráfego para redes BaseT e redes POL. Após certo volume de usuários atendidos as redes BaseT podem se tornar mais vatajosas quanto ao consumo de energia elétrica.

redes não refrigeradas.

É preciso destacar quanto à Figura 4.1 que não estão demonstrados os casos médios. Apenas foram plotadas as curvas de máximo consumo e de mínimo consumo de energia elétrica, ou seja, carga máxima de dados e ausência de carga de dados. Retoma-se, para esclarecimento de eventuais questionamentos, o modelo matemático analítico da Equação 4.1:

$$E_{eq} = T * (C_{beq} + C_{b_{p1}} + C_{b_{p2}} + \dots + C_{b_{pn}}) + N_{bytes_{p1}} * E_{byte_{p1}} + N_{bytes_{p2}} * E_{byte_{p2}} + \dots + N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}} \quad (4.1)$$

Esta Equação já foi discutida nos dois capítulos anteriores. A curva de consumo máximo ocorre que os termos $N_{bytes_{p1}} * E_{byte_{p1}}$ a $N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}}$ são máximos, ou seja, quando as portas estão sendo utilizadas em sua máxima capacidade de tráfego. Em particular, para uma dada porta n , o termo $N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}}$ se iguala ao valor de consumo da porta em estado ativo. Para a verificação destes valores, basta verificar os parâmetros utilizados para cada tipo de porta (Tabelas 3.1 e 3.2). O caso mínimo para esta mesma porta n se refere às situações onde $N_{bytes_{pn}} * E_{byte_{pn}} = 0$. Logo, os casos médios são todos

aqueles onde $0 < N_{bytes_{pn}} < N_{max}$, onde N_{max} é a capacidade máxima de tráfego da porta. Matematicamente está claro que uma eventual curva relacionada aos casos médios estará obrigatoriamente entre as curvas de consumo máximo e as curvas de consumo mínimo para uma rede específica dentre as apresentadas na Figura 4.1.

4.2 Resultados Obtidos com Simulações

Conforme mencionado ao longo dos Capítulos anteriores, a metodologia de avaliação de desempenho demanda um método de partida, que na presente dissertação foi o cálculo por meio do modelo analítico, e um método de confirmação dos resultados, que no trabalho em tela foi a simulação, realizada no NS-3, conforme relatado no Capítulo 3. Considerando a forma como os resultados do cálculo analítico foi disposto, apresenta-se a seguir os resultados em separado das simulações, com aplicações UDP echo, VoIP e HTTP.

Em todos os casos de aplicações, é preciso estar atento que devido a diferenças de como cada tecnologia de rede trabalha o envio de dados e o processo de empacotamento e acréscimos de cabeçalhos, o volume de dados na camada física (**bytes**) se diferencia. A tendência é que nunca sejam iguais. Entretanto é preciso estar claro que na camada de aplicação, onde tal efeito é transparente, os comportamentos são aproximados, validando o experimento.

Esperava-se, conforme mencionado em epígrafe, que as curvas estivessem próximas das curvas mínimas obtidas no cálculo analítico, salvo no caso das curvas relacionadas a consumos com refrigeração dos equipamentos. A razão é que a maior parte dos consumos de energia está relacionada com o consumo básico dos equipamentos. Embora a energia economizada pelos referidos padrões de economia de energia seja importante, os consumos são elevados o suficiente para se constituírem em fator importante quando do cálculo de consumo de energia elétrica. Não foi realizado cálculo de encontro de retas com curvas de consumo máximo, mas sim com curvas de consumo sem refrigeração, uma vez que as curvas estão relacionados com consumo de energia com base no tráfego de dados da aplicação.

Para os valores obtidos nas simulações se dispõe em tabelas os valores médios encontrados, referentes ao volume de dados trafegados nas camadas inferiores, e de consumo de energia elétrica resultante.

Nas simulações, relembra-se, houve a oportunidade de se calcular consumos de energia relativamente próximos de uma realidade pouco comum, onde a rede tem aplicação única em determinado momento. Contudo, nesta situação, ambas as redes tenderiam a ter curvas com reduzido coeficiente de inclinação. Os referidos resultados estão dispostos nas Subseções à seguir.

Finalmente, é importante frisar que os intervalos de confiança calculados ficaram na casa de mJ (*miliJoules*), o que não permitiu serem mostrados nas figuras, as quais apresentam resultados na ordem de grandeza de centenas ou milhares de Joules (W*s).

4.2.1 Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação UDP echo

Os valores de energia consumida e de carga média de dados nas simulações com aplicações UDP são dispostas nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 à seguir, e consolidados na Figura 4.4. As diferenças de carga de dados entre as redes BaseT e as redes POL não foram tão significativas, especialmente quanto ao consumo de energia consumida por *byte*, que podem ser visualizadas no Capítulo 3.

Tabela 4.1: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com UDP echo para redes com 32 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	1.337,80	10583672
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	1.263,04	
POL Watchfull / Sem Refrig	1.236,45	
POL No Sleep / Com Refrig	2.037,80	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	1.963,04	
POL Watchfull / Com Refrig	1.936,45	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	4.632,34	11464481,2
BaseT Sem LPI / Com Refrig	9.264,68	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	4.357,36	
BaseT Com LPI / Com Refrig	8.714,71	

As três tabelas evidenciam os problemas verificados no cálculo analítico: Uma grande influencia do consumo básico dos equipamentos escolhidos para utilização dos parâmetros, tanto cálculo, quanto da simulação. Se torna, novamente, evidente que as redes que são construídas com forte dependência de refrigeração tendem a ser demasiado desvantajosas quanto ao consumo de energia elétrica.

As curvas de consumo com base no volume de usuários, obtidos com as simulações UDP echo são demonstradas na Figura 4.4.

Tabela 4.2: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com UDP echo para redes com 128 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	3.251,20	42231594
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	2.952,17	
POL Watchfull / Sem Refrig	2.845,79	
POL No Sleep / Com Refrig	3.951,20	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	3.652,17	
POL Watchfull / Com Refrig	3.545,79	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	5.965,47	44756945,6
BaseT Sem LPI / Com Refrig	11.930,93	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	5.371,49	
BaseT Com LPI / Com Refrig	10.742,98	

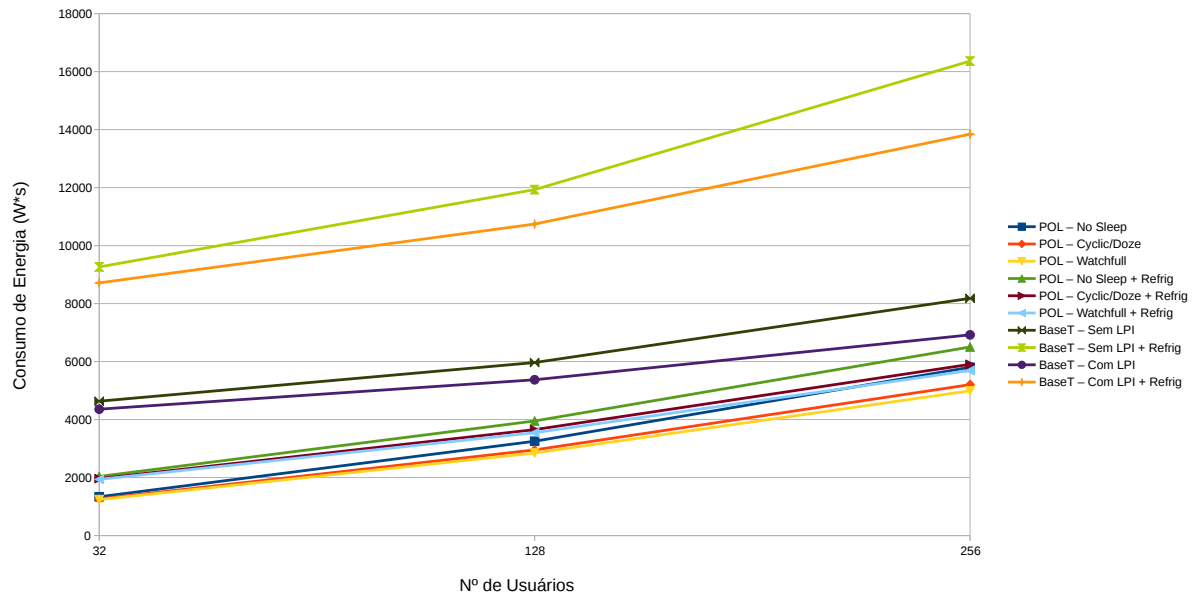


Figura 4.4: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego UDP echo em redes BaseT e redes POL.

As curvas, como esperado, se encontram muito próximas das curvas de consumo mínimo obtidas nos cálculos analíticos. Tal fato não confirma apenas que os resultados do modelo analíticos apresentam resultados aceitáveis, mas que as escolhas dos equipa-

Tabela 4.3: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com UDP echo para redes com 256 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	5.802,40	6*84363904,6
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	5.204,33	
POL Watchfull / Sem Refrig	4.991,58	
POL No Sleep / Com Refrig	6.502,40	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	5.904,33	
POL Watchfull / Com Refrig	5.691,58	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	8.180,94	4*88971839,2
BaseT Sem LPI / Com Refrig	16.361,88	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	6.920,52	
BaseT Com LPI / Com Refrig	13.841,03	

mentos, em especial quanto à necessidade de refrigeração ou não, bem como quanto ao equipamento ter o porte adequado para o tamanho da rede são de fato os fatores preponderantes para a definição da eventual vantagem quanto à economia de energia de uma determinada rede de dados.

Da mesma maneira como foi realizado para os cálculos analíticos, apresenta-se na Figura 4.5 um comparativo das inclinações das curvas resultantes das simulações em tela. Neste caso, utilizando a curva mais vantajosa para cada caso (BaseT ou POL).

Verifica-se, confirmando os resultados analíticos, que as curvas relacionadas às redes BaseT não refrigeradas possuem inclinações mais baixas até mesmo que as redes POL. Em especial, se a rede BaseT for operada com a tecnologia IEEE 802.3az, LPI (do inglês, *Low Power Idle*, ou baixo consumo em estado inativo), então se tem a curva de menor inclinação. A curva de rede POL de menor inclinação é a com a tecnologia do *Watchfull Sleep Mode*. Os consumos destas duas redes seriam equivalentes ou apresentariam consumo menor para as redes BaseT à partir da casa dos 619 usuários, tamanho que permite a disposição de equipamentos de forma a dispensar ou reduzir a refrigeração e até mesmo adotar um *switch core* de menor porte em comparação ao utilizado. Este tamanho de rede também permitiria reduzir os níveis de agregação de *switches*.

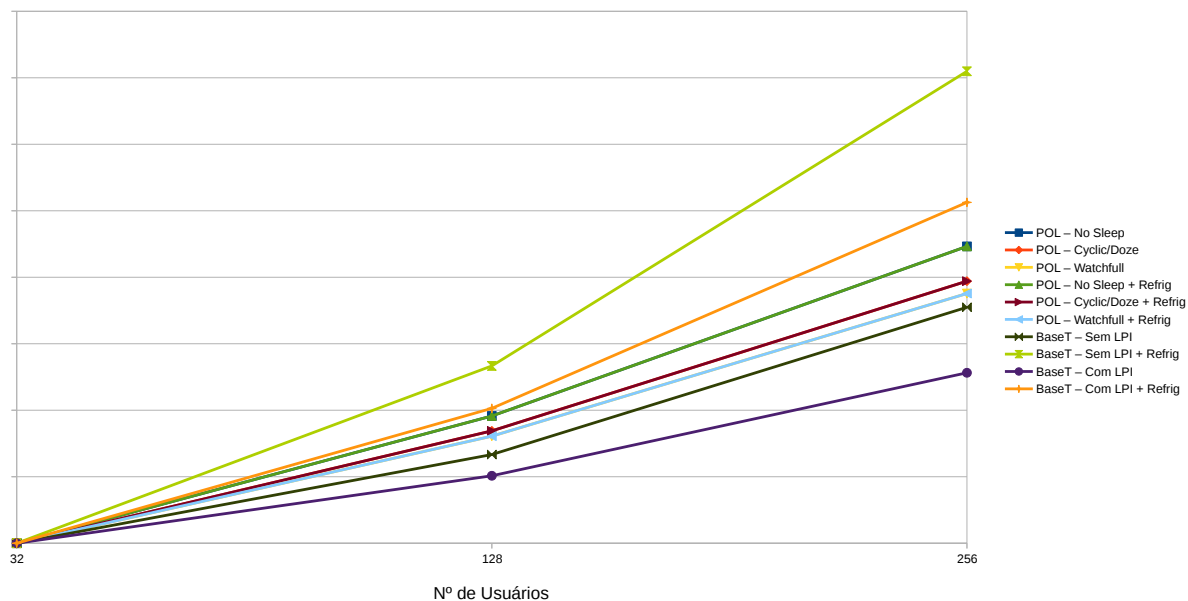


Figura 4.5: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego UDP echo em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.

4.2.2 Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação VoIP

Os resultados obtidos por meio das simulações com aplicação VoIP são apresentados de forma análoga aos resultados obtidos com a aplicação UDP echo.

Como as características de uma aplicação VoIP determinam o uso de pacotes UDP muito pequenos, com um pico de 60 *bytes* e com intervalos na casa de 0.06 segundos, então a carga de dados trafegados tendeu a ser muito reduzida. As Tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam os valores de consumo de energia e de carga de dados obtidos para a aplicação em tela. As diferenças em *bytes* nas camadas inferiores das redes não foi suficiente para gerar grande disparidade do consumo com tráfego em comparação com a rede concorrente e tampouco com o consumo básico das redes.

As simulações com aplicação VoIP, como citado em epígrafe, apresentaram cargas de dados muito reduzidas. Por consequência, o consumo de energia elétrica derivado do tráfego de dados foi muito reduzido. Assim, as curvas de consumo de energia elétrica em relação ao número de usuários se aproximaram muito das cruvas de consumo mínimo dos equipamentos, muito próximo de seus consumos básicos. A Figura 4.6 apresenta o gráfico relativo a esta questão.

Considerando o já conhecido efeito do uso de refrigeração e do efeito que um equipamento central (o *switch core* das redes BaseT) pode gerar em termos de impacto no consumo de energia, apresenta-se na Figura 4.7 a plotagem do gráfico considerando a mesma origem para as curvas.

Tabela 4.4: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com VoIP para redes com 32 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	1.337,80	852624
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	1.262,93	
POL Watchfull / Sem Refrig	1.236,29	
POL No Sleep / Com Refrig	2.037,80	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	1.962,93	
POL Watchfull / Com Refrig	1.936,29	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	4.632,34	500365,4
BaseT Sem LPI / Com Refrig	9.264,68	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	4.356,99	
BaseT Com LPI / Com Refrig	8.713,99	

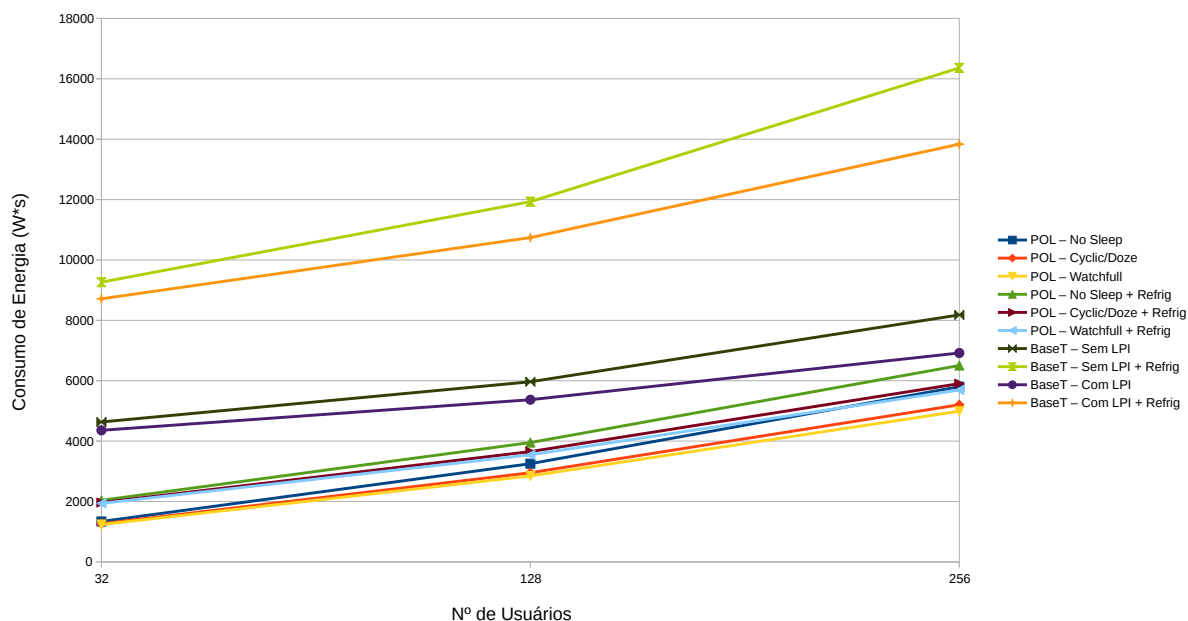


Figura 4.6: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego VoIP em redes BaseT e redes POL.

Considerando os resultados apresentados, novamente as redes BaseT só podem ser desvantajosas em situações nas quais demandem refrigeração 1 x 1. A Figura 4.7 deixa

Tabela 4.5: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com VoIP para redes com 128 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	3.251,20	3401449,6
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	2.951,72	
POL Watchfull / Sem Refrig	2.845,17	
POL No Sleep / Com Refrig	3.951,20	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	3.651,72	
POL Watchfull / Com Refrig	3.545,17	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	5.965,47	2382461,6
BaseT Sem LPI / Com Refrig	11.930,93	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	5.370,23	
BaseT Com LPI / Com Refrig	10.740,47	

claro que em tal situação, mesmo sem LPI, desde que dispensada a refrigeração, a rede BaseT possui um gráfico de consumo em relação ao número de usuários com inclinação menor que todas as redes POL.

Como exemplo de que a vantagem em economia de energia da rede óptica não é inequívoca, a curva da rede BaseT sem LPI e sem refrigeração cruza a curva da rede POL com *Watchfull Sleep Mode* com um volume de cerca de 315 usuários. No entanto se trata de uma situação muito específica. Uma rede real raramente estaria sendo usada com uma única aplicação com tão reduzido volume de dados. Porém o resultado permite mais uma vez concluir a validade da hipótese.

O baixo volume de tráfego poderia ter sido mitigado com a mudança das características e parâmetros das simulações. Por exemplo, se poderia ter utilizado um conjunto de chamadas com durações equivalentes a todo o tempo de simulação e se poderia ter feito com que todos os usuários obrigatoriamente realizassem chamadas. No entanto, para uma aplicação VoIP em ambientes corporativos esta situação não é verdadeira. Os usuários tendem a utilizar os serviços com chamadas com diferentes durações e com momentos de início e final de chamadas, a rigor, imprevisíveis. Ademais, mesmo que se adotasse a premissa de todas as chamadas durarem todo o tempo de simulação, se teria no máximo, uma aproximação maior com os resultados obtidos com a aplicação UDP echo, que como já demonstrado, confirmaram, assim como os resultados com a aplicação VoIP, as respostas

Tabela 4.6: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com VoIP para redes com 256 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	5.802,40	6795203,2
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	5.203,44	
POL Watchfull / Sem Refrig	4.990,35	
POL No Sleep / Com Refrig	6.502,40	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	5.903,44	
POL Watchfull / Com Refrig	5.690,35	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	8.180,94	4913822,4
BaseT Sem LPI / Com Refrig	16.361,88	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	6.918,08	
BaseT Com LPI / Com Refrig	13.836,16	

obtidas pelo modelo analítico.

4.2.3 Resultados Obtidos com Simulação de Aplicação HTTP

As duas aplicações utilizadas nos conjuntos de simulações para os quais se apresentou os resultados anteriores consistiam em aplicações UDP. Conforme apresentado no Capítulo 3, o experimento da presente dissertação considerou também uma aplicação TCP, qual seja, uma aplicação HTTP para o NS-3.

Tal aplicação tende a utilizar uma banda e uma carga de dados maior que as duas aplicações anteriores (UDP echo e VoIP). Assim o comportamento das redes em simulação tenderia a se aproximar um pouco mais de comportamentos de redes reais. Ademais, conforme relatado no Capítulo 3 se utilizou um tempo de 5 segundos com as requisições do serviço tendendo a se iniciar aproximadamente no instante inicial da simulação e se encerrando próximo do instante final. É preciso destacar, contudo, que o volume de requisições de cada usuário pode ser diferente sendo essa variável aleatória. Não havia como garantir com absoluta certeza que a aplicação HTTP utilizada teria comportamento muito próximo entre um usuário e outro como ocorreu nas aplicações UDP echo e VoIP.

Um ponto importante é que para esta aplicação, em havendo maior ocupação da banda, havia também a tendência de envio de pacotes maiores. Esta variável é importante para a análise, uma vez que no ambiente de simulação das redes POL utilizada, o *upstream*

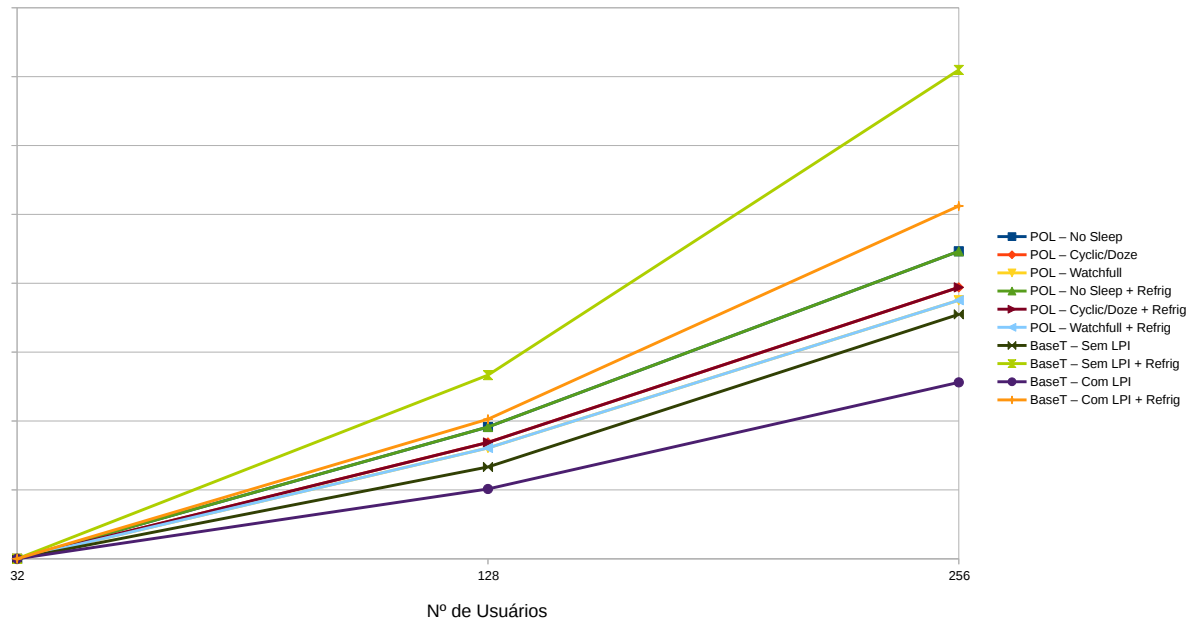


Figura 4.7: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego VoIP em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.

tendia a utilizar dois envios de dados, e portanto dois pacotes POL da ONU para a OLT, quando os pacotes possuíam mais que 1470 *bytes*, gerando um grande aumento do *overhead* (dados de cabeçalho e fechamento dos pacotes em camadas inferiores às de aplicação) uma vez que pacotes *Ethernet* podem facilmente possuir até 1500 *bytes*. Neste caso a disparidade entre o volume de dados nas camadas inferiores tendeu a ser o maior entre as três aplicações simuladas.

Entretanto, destaca-se novamente que mesmo com todas estas variáveis, na camada de aplicação há limites de máximo e de mínimo nas simulações quanto ao comportamento dos usuários. A aplicação HTTP escolhida está de acordo com parâmetros aceitos pela academia, conforme destacado no Capítulo 3. Assim, os experimentos permitem mais uma vez que os resultados obtidos sejam aceitáveis.

A exemplo dos resultados apresentados nas Seções anteriores, apresenta-se nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 os valores de consumo de energia e de cargas de dados para as simulações com aplicação HTTP.

Considerando, então, que mesmo havendo uma diferença um pouco mais acentuada nas camadas inferiores para esta aplicação HTTP no simulador, mas havendo um comportamento aproximado com relação aos usuários na camada de aplicação, e que portanto a simulação apresenta um resultado passível de permitir uma comparação entre as redes simuladas, apresenta-se novamente uma situação de aparente vantagem da rede POL

Tabela 4.7: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com HTTP para redes com 32 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	668,90	54208480
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	632,08	
POL Watchfull / Sem Refrig	619,00	
POL No Sleep / Com Refrig	1.018,90	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	982,08	
POL Watchfull / Com Refrig	969,00	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	2.316,17	17432253,2
BaseT Sem LPI / Com Refrig	4.632,34	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	2.178,75	
BaseT Com LPI / Com Refrig	4.357,49	

quanto ao consumo de energia elétrica.

Graficamente, se apresenta os resultados desta simulação na Figura 4.8. Com os parâmetros utilizados, e ao menos para as quantidades de usuários apresentados na Figura 4.8, há uma aparente vantagem da rede POL quanto à métrica do consumo de energia elétrica.

Porém, para a aplicação HTTP, se evidencia melhor uma questão não tão simples de ser visualizada nos resultados das simulações UDP echo e VoIP. Há uma influência relacionada à configuração da rede POL. Como há uma introdução maior de *overhead* neste caso, então as curvas relativas às redes ópticas se aproximaram menos das curvas de consumo mínimo se comparadas às redes BaseT. Assim, estas curvas relacionadas às redes ópticas se apresentaram ainda mais inclinadas em relação às redes BaseT que nas simulações com aplicações UDP echo e VoIP. O estudo destas inclinações pode ser visualizado na Figura 4.9.

Considerando novamente uma regressão linear e o ponto de encontro de pares de curvas, comparando as curvas POL com *Cyclic Sleep Mode/Doze Mode* com a curva BaseT com LPI sem refrigeração, se verifica que estas se encontrariam aproximadamente com um volume de 377 usuários.

Tabela 4.8: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com HTTP para redes com 128 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	1.625,60	228618251,8
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	1.478,47	
POL Watchfull / Sem Refrig	1.426,18	
POL No Sleep / Com Refrig	1.975,60	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	1.828,47	
POL Watchfull / Com Refrig	1.776,18	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	2.982,73	55502570
BaseT Sem LPI / Com Refrig	5.965,47	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	2.679,64	
BaseT Com LPI / Com Refrig	5.359,27	

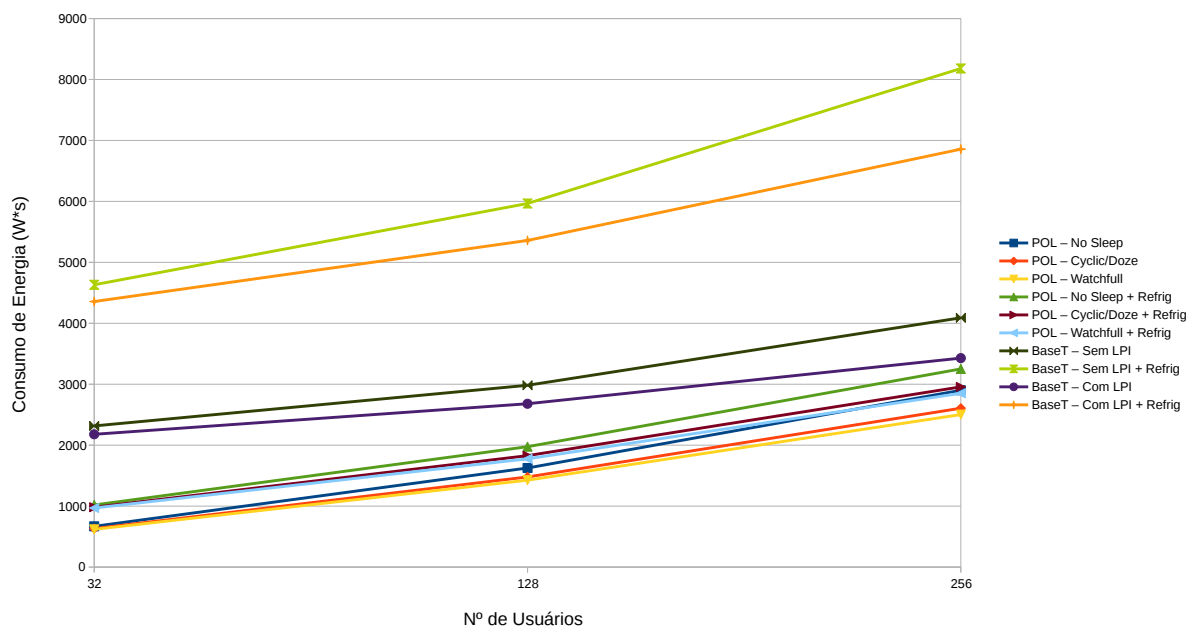


Figura 4.8: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego HTTP em redes BaseT e redes POL.

Tabela 4.9: Consumo de energia em W*s e carga de dados trafegados em *bytes* nas simulações com HTTP para redes com 256 usuário/nós finais.

Tipo de Rede	Energia Consumida (W*s)	Carga de Dados Média (bytes)
POL No Sleep / Sem Refrig	2.901,20	424923815
POL Cyclic/Doze / Sem Refrig	2.606,58	
POL Watchfull / Sem Refrig	2.501,85	
POL No Sleep / Com Refrig	3.251,20	
POL Cyclic/Doze / Com Refrig	2.956,58	
POL Watchfull / Com Refrig	2.851,85	
BaseT Sem LPI / Sem Refrig	4.090,47	63036184,2
BaseT Sem LPI / Com Refrig	8.180,93	
BaseT Com LPI / Sem Refrig	3.428,56	
BaseT Com LPI / Com Refrig	6.857,12	

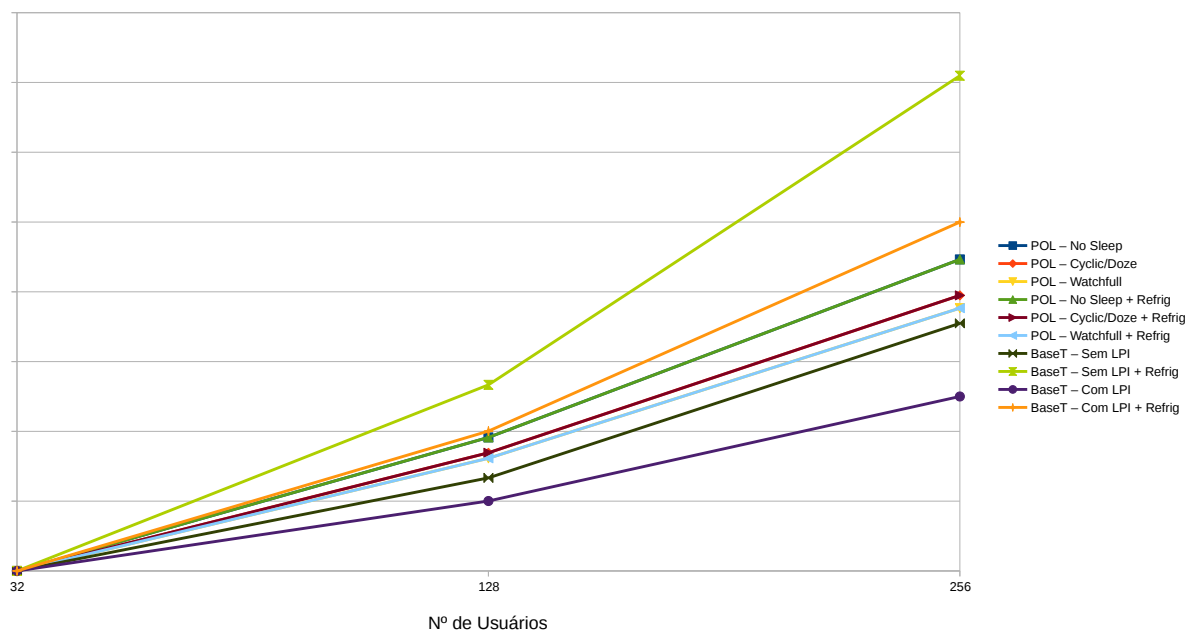


Figura 4.9: Consumo de energia elétrica em função do número de usuários conectados, rede em funcionamento por 10 segundos, consumos com tráfego HTTP em redes BaseT e redes POL, redução à origem comum.

4.3 Considerações adicionais sobre os resultados obtidos

Os resultados nos permitiram diversas conclusões, com destaque para a confirmação de nossa hipótese, uma vez que a vantagem das redes POL em relação às redes BaseT quanto

à métrica de consumo de energia não é inequívoca, ou seja, há situações e condições nas quais adotar estratégias de economia de energia em rede BaseT pode ser mais vantajoso que alterar a rede para uma tecnologia POL.

Como não há a certeza absoluta de tal economia, se optou por não realizar os cálculos financeiros sobre a viabilidade de substituição. Tal cálculo se tornaria imprescindível com uma negação da hipótese, o que não ocorreu. Ademais, seria preciso ter uma definição clara dos equipamentos a serem empregados numa eventual rede POL a ser instalada na Presidência da República que permitissem cálculos como os apresentados em Dias [52].

Em adição, apresentou-se como possibilidade de redução de consumo a implementação gradual do padrão IEEE 802.3az e de formas alternativas de refrigeração dos equipamentos empregados na rede BaseT da Presidência da República, ou ainda, a implementação gradual de equipamentos que até mesmo não necessitam de refrigeração.

Uma questão que pode ser suscitada sobre os resultados da pesquisa em tela, pode ser brevemente debatida. Como seria o resultado de uma eventual alteração das topologias das redes submetidas à avaliação de desempenho? Quanto à topologia da rede POL há pouca alteração possível. A topologia utilizada no experimento é a topologia padrão, uma OLT compondo o nó central da rede interligando as diversas ONUs, que por sua vez fornecem o acesso aos nós finais.

Quanto à topologia da rede BaseT, seria possível realizar algumas alterações mais significativas. Estas alterações, contudo, consistem basicamente em novas camadas relacionadas a agregação de *switches* de acesso, por exemplo, do lado do servidor, ou mais camadas entre os *switches* de acesso e o *switch core*. Estas agregações aumentariam, no caso analisado, apenas algumas portas de 10 Gb/s e alguns chassis, no caso, de aproximadamente 47 W de consumo básico. Seu efeito nos resultados seria um retardamento dos encontros das curvas de redes BaseT com redes POL. A depender do número de switches agregados, de fato, as redes POL poderiam ser mais vantajosas quanto ao consumo de energia elétrica.

No entanto, a presente pesquisa foi realizada com foco na situação da Presidência da República. Neste sentido, destaca-se novamente que as escolhas pelos diversos parâmetros e topologias objetivou similaridades com o caso concreto, sendo viável o aproveitamento da metodologia para outros casos específicos.

Os resultados evidenciam que a rede POL se encontra desfavorecida quanto ao consumo de energia elétrica devido ao alto volume de ONUs empregadas, e a rede BaseT se encontra desfavorecida quando se utiliza refrigeração e quando a agregação de camadas de *switches* aumenta. Logo, a aplicabilidade do resultado está muito interligada com o caso concreto.

O resultado obtido é válido para um amplo escopo no sentido de que a vantagem eventual de uma rede POL não é inequívoca como costuma ser propagado por agentes

de mercado. Neste sentido, a confirmação da hipótese da presente dissertação permite dizer que o estudo atinge o objetivo proposto e fornece a contribuição de estabelecer uma metodologia de verificação de informações propagandeadas pelos referidos agentes.

No Capítulo 5 se apresenta as conclusões da presente dissertação bem como algumas possibilidade de trabalhos futuros que aprimorem a metodologia e os resultados obtidos.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste Capítulo 5 são descritas as conclusões relacionadas ao estudo desenvolvido nesta dissertação e são apresentadas algumas possibilidades de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

Considerando o consumo de energia elétrica de equipamentos de transmissão de dados, a necessidade que se adote equipamentos que promovam a *Green IT* (TI verde), a responsabilidade da promoção da aderência às recomendações do projeto *Esplanada Sustentável* bem como a aferição de informações de empresas fornecedoras de equipamentos de rede em um momento onde se planeja a modernização da rede de dados de Presidência da República, a presente dissertação discutiu se a adoção de redes POL (Redes Locais Ópticas Passivas) em substituição a redes locais com cabeamento BaseT tradicionais seria capaz de gerar economia de energia elétrica de forma a compensar sua substituição.

Para tanto, entendendo que o método científico da análise de desempenho seria o mais adequado, buscou-se estruturar um modelo matemático-analítico que medisse este consumo de energia para redes BaseT e redes POL. À obtenção de resultados com este modelo matemático-analítico seguiu-se a construção de simulações com o simulador *NS-3*.

Tanto para as redes BaseT, como para as redes ópticas, cálculos e simulações consideraram ausência e capacidade de economia de energia elétrica em função da ausência ou presença de tráfego de dados. Os padrões de economia de energia abordados para as redes ópticas foram o *Cyclic Sleep Mode*, o *Doze Mode* e o *Watchfull Sleep Mode*. Os resultados para possibilitar os cálculos para estes padrões e para suas ausências estavam baseados em resultados encontrados na literatura.

Para as redes BaseT foi considerado o padrão IEEE 802.3az que se encontra implementado e passível de simulação por meio do *framework* ECOFEN para o NS-3.

As simulações para ambos os tipos de redes consideraram três aplicações: UDP echo, VoIP e HTTP. Cada simulação foi realizada para as quantidades de 32, 128 e 256 nós finais/usuários, considerando para cada situação 5 sementes diferentes.

Considerava-se ao início dos trabalhos que caso as redes POL se mostrassem, de fato e inequivocamente, mais vantajosas quanto ao consumo de energia elétrica, seria verificado em quanto tempo o investimento em uma rede deste tipo retornaria, o que determinaria a viabilidade financeira da substituição analisada.

Assim, se tinha como **objetivo** geral da dissertação: *Comparar consumos de energia elétrica em redes locais baseadas em meios de transmissão metálicos (Redes BaseT) e em meios de transmissão ópticos (Redes POL), verificando se a adoção de Redes POL em substituição a Redes BaseT apresentaria vantagens segundo métricas de consumo de energia e por consequência de valores financeiros derivados de forma simples - projeção de consumo em relação ao custo de aquisição e implementação.*

A **hipótese** levantada foi a de que *a troca de tecnologia BaseT por POL não é inequivocamente vantajosa em termos energéticos*. O resultado de economizar ou não energia depende das características dos equipamentos empregados nas redes BaseT e POL, empregando a última um grande volume de equipamentos ONUs, e portanto a vantagem da rede POL não consiste em um fato absoluto e inequívoco em relação à métrica de economia de energia.

Os resultados obtidos inicialmente pareciam indicar a negação da hipótese. No intervalo de números de usuários apresentado, bem como com os parâmetros adotados em virtude dos equipamentos tomados como exemplo, que no caso da rede BaseT derivava da semelhança de consumo de energia e de capacidades de tráfego de dados dos equipamentos atualmente utilizados na Presidência da República, todos os resultados obtidos de consumo de energia, tanto no modelo analítico, quanto nas simulações, indicavam um menor consumo de energia elétrica para as redes POL.

Entretanto, verificou-se que as curvas de consumo de energia em relação ao número de usuários era menor para as redes BaseT quando desconsiderada a refrigeração. O crescimento das curvas concernentes às redes POL estavam relacionados ao citado grande número de ONUs em utilização para a composição dos enlaces. E verificou-se ainda que o *switch core* tomado como exemplo não é a única alternativa para composição do nó central da rede.

Assim, sob certas condições, a alegada vantagem de economia de energia elétrica por parte das redes POL não é uma verdade inequívoca e absoluta. Logo, a hipótese da dissertação foi confirmada.

Com a hipótese confirmada, não se realizou um cálculo de viabilidade financeira da substituição da rede. Concluiu-se que tal cálculo de viabilidade de substituição de uma

rede BaseT por uma rede POL depende diretamente da tecnologia empregada em cada tipo de rede, bem como das possibilidades relacionadas com a eventual redução de consumo de energia com refrigeração, e ainda, considerando as capacidades dos equipamentos quanto ao emprego dos padrões de redução de consumo de energia em estados *idle*.

No caso da Presidência da República seria preciso, então, que as eventuais ofertas de modernização da rede estejam acompanhadas de informações suficientes para a adoção de parâmetros que permitam uma avaliação de desempenho como a adotada na presente dissertação.

Conforme a literatura apresentada, há muitas técnicas que permitem a redução de consumo de energia com refrigeração de equipamentos de TI. Ainda, alguns equipamentos de rede podem adotar tecnologias que além de demandar menos refrigeração, podem economizar energia com adoção de estados *idle*. Ainda, uma rede pode ser planejada de forma a reduzir os impactos derivados da agregação de *switches* e do alto volume de consumo básico de energia de nós centrais (*switches core*). Logo, pode haver casos em que considerando o consumo de energia elétrica, a rede BaseT tem a possibilidade de ser mais econômica que as redes POL.

5.2 Trabalhos Futuros

Na presente dissertação, conforme evidenciado pelo Capítulo 2, no qual se verificou que a temática de redes e de TI verde é um campo de pesquisa prolífico, verificou-se que a pesquisa pode ser expandida, melhorada e aprofundada em oportunidades futuras, não apenas pelo autor, mas por outros pesquisadores, tanto de programas de mestrado e doutorado profissional, como de programas de pós-graduação acadêmicos.

Para estudos mais voltados à pesquisas acadêmicas, a melhoria dos frameworks de simulação de consumo de energia de equipamentos de transmissão de dados já é um campo bem vasto. O trabalho de Orgerie et al. [21] inclusive cita uma oportunidade muito interessante: o desenvolvimento de funções no ECOFEN para a pesquisa em redes ópticas, à semelhança do que já existe para as redes cabeadas. Este módulo abriria campo de estudo para diversas pesquisas sobre economia de energia em redes ópticas, que hoje não encontra muitos frameworks de simulação, incluindo no simulador NS-3.

O aprimoramento das capacidades de pesquisas, não só de energia, como de outros aspectos de redes ópticas no NS-3 adiciona, ainda, novas oportunidades de pesquisa acadêmica.

Também se encontra escasso no simulador *Omnet++* meios de se simular o padrão IEEE 802.3az. Para a dissertação ora apresentada este foi um dos fatores que reduziu a capacidade de se utilizar o referido simulador. Mesmo para as redes POL, não havia

ainda um simulador adequado no *Omnet++* uma vez que havia meios de simular portas ópticas da ONU, mas não a ONU como um todo.

Há ainda oportunidades de que capacidades semelhantes às do ECOFEN sejam implementadas em outros simuladores de rede, que por serem os mais diversos e variados, acabam por permitirem diversas pesquisas tanto de implementações, como de utilização e avaliação destas implementações.

Considerando a aplicação da metodologia adotada para organizações como empresas e órgãos públicos, poderia se realizar um mapeamento do processo utilizado, de maneira que tal avaliação pudesse ser aplicada a diversos casos específicos. Como proposta de abordagem do problema de avaliação de consumo de energia em redes de dados, a metodologia utilizada é aplicável a qualquer cenário, bastando que os parâmetros sejam ajustados às realidades das redes das organizações que eventualmente adotem tal avaliação, bastando que para isso se verifique adequadamente as características dos equipamentos que estas organizações utilizem, e quais os equipamentos que eventualmente pretenda comparar.

Assim, verifica-se como uma das contribuições mais significativas da presente dissertação a aplicabilidade da metodologia a novos casos concretos. No caso, parâmetros, topologias, aplicações, cargas de dados, dentre outros aspectos, podem ser alterados com vistas a obter resultados específicos para cada situação.

Outro trabalho futuro que pode ser iniciado à partir do resultado obtido pela presente dissertação seria a verificação de estratégias e processo que permitam a redução do consumo de energia de equipamentos já empregados ou de tecnologias já empregadas nas redes de dados corporativas. Por exemplo, o estudo de meios alternativos para provimento de energia para a refrigeração de equipamentos, a adoção gradual de equipamentos que demandem pouco ou nenhuma refrigeração, a adoção de algoritmos de transmissão de dados mais adequados à redução de economia de energia, dentre outros.

Em verdade, o regramento ou regulamentação deste tipo de avaliação quanto a aquisições de equipamentos nas organizações públicas poderia ser outro campo de estudo possível. Ao momento apresentar a possibilidade de adotar uma avaliação de desempenho com critérios acadêmicos para que as organizações públicas direcionem melhor as decisões acerca de modernizações e melhorias em seus equipamentos de TI é um resultado tão importante quanto o resultado da avaliação de desempenho fornecido por meio do presente estudo.

Referências

- [1] R. O. C. Hirafuji, “Energy Efficiency in Next Generation Passive Optical Networks,” Ph.D. dissertation, Brasília (DF), 2014. x, 8, 9, 23, 24, 25, 30, 33, 35, 37
- [2] S. S. W. Lee and A. Chen, “Design and Analysis of a Novel Energy Efficient Ethernet Passive Optical Network.” IEEE, 2010, pp. 6–9. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5474018/> x, 10, 11, 12
- [3] R. Pimentel, “DP83822 Energy Efficient Ethernet IEEE 802.3az,” Aug. 2015. x, 18, 19, 20
- [4] S. Murugesan and G. R. Gangadharan, “Green IT: An Overview.” John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 1–21. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118305393.ch1> 1
- [5] C. Peoples, G. Parr, S. McClean, and P. Morrow, “Green Networks and Communications.” John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 127–148. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/9781118305393.ch7> 1
- [6] MPOG, “Esplanada Sustentável,” 2012. [Online]. Available: <http://www.orcamentofederal.gov.br/projeto-esplanada-sustentavel> 1, 2, 12, 28
- [7] Y. Ruan, N. Anerousis, M. Srivatsa, J. Xiao, R. T. Christner, L. Farrolas, and J. Short, “Measuring enterprise network usage pattern & deploying passive optical LANs.” IEEE, 2015, pp. 890–893. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7140402/> 2, 3, 9
- [8] SLTI, *Instrução Normativa Nº 01, de 19 de Janeiro de 2010*, 2010. [Online]. Available: <http://www.comprasnet.gov.br/legislacao/legislacaoDetalhe.asp?ctdCod=295> 2
- [9] M. Alonso, “Custos no serviço público,” *Revista do Serviço Público*, vol. 50, no. 1, pp. 37–63, 2014. [Online]. Available: <https://revista.enap.gov.br/index.php/RSP/article/view/340> 2
- [10] R. Jain, *Art of Computer System Performance Analysis Techniques For Experimental Design measurement Simulation And Modeling*, 1st ed. John Wiley & Sons, Inc, 1991. 3, 4, 26, 35
- [11] NS-3, “NS-3 - Energy Model.” [Online]. Available: https://www.nsnam.org/wiki/Energy_model 4, 26

- [12] J. F. Kurose and K. W. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach (6th Edition)*, 6th ed. Pearson, 2012. 7, 8
- [13] J. Dunlop and D. Smith, *Telecommunications Engineering, 3rd Edition*. Taylor & Francis, 1994. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=-kyPyn3Dst8C> 7, 8
- [14] C. Murthy and M. Gurusamy, *WDM Optical Networks: Concepts, Design, and Algorithms*. Prentice Hall PTR, 2002. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=du1SAAAAMAAJ> 8
- [15] C. Lam, *Passive Optical Networks: Principles and Practice*. Elsevier Science, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=DSO5CVBuhKEC> 8, 22
- [16] G. Kramer, *Ethernet Passive Optical Networks*, ser. Professional Engineering. McGraw-Hill Education, 2005. [Online]. Available: https://books.google.com.br/books?id=leTxSysNE_kC 8, 22
- [17] I. Radovanovic, W. van Etten, and H. Freriks, “Ethernet-based passive optical local-area networks for fiber-to-the-desk application,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 11, pp. 2534–2545, Nov. 2003. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1251081/> 9
- [18] G. Kramer and G. Pesavento, “Ethernet passive optical network (EPON): building a next-generation optical access network,” *IEEE Communications magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 66–73, 2002. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/983910/> 9, 22
- [19] K. Hinton, J. Baliga, M. Feng, R. Ayre, and R. S. Tucker, “Power consumption and energy efficiency in the internet,” *IEEE Network*, vol. 25, no. 2, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5730522/> 10, 11, 16, 17, 22
- [20] S. S. Ramli, M. H. Hanapei, M. R. Yahya, N. A. Omar, and M. K. Almsafir, “The Impact of GPON Technology on Power Consumption and Carbon Footprint in Malaysia,” *Purity, Utility Reaction and Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 20–33, 2013. 10, 11
- [21] A.-C. Orgerie, L. Lefevre, I. Guerin-Lassous, and D. M. L. Pacheco, “Ecofen: An end-to-end energy cost model and simulator for evaluating power consumption in large-scale networks.” *IEEE*, 2011, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5986203/> 10, 12, 13, 15, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 36, 61
- [22] F. Kaup, S. Melnikowitsch, and D. Hausheer, “Measuring and modeling the power consumption of OpenFlow switches.” *IEEE*, 2014, pp. 181–186. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7014156/> 10, 11
- [23] S. Nedeveschi, L. Popa, G. Iannaccone, S. Ratnasamy, and D. Wetherall, “Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-Adaptation.” vol. 8, 2008, pp. 323–336. 10

- [24] H. Barrass, C. M. Bennett, and B. Nordman, “Energy efficient ethernet,” *IEEE802.3 Energy Efficient Ethernet Study Group*, 2007. 10
- [25] P. Bispo, D. Corujo, and R. L. Aguiar, “A qualitative and quantitative assessment of SDN controllers.” IEEE, 2017, pp. 6–11. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7935632/> 11
- [26] Y. E. Oktian, S. Lee, H. Lee, and J. Lam, “Distributed SDN controller system: A survey on design choice,” *Computer Networks*, vol. 121, pp. 100–111, Jul. 2017. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1389128617301706> 11
- [27] E. B. Gondim, R. O. Hirafuji, and D. R. Campelo, “Eficiência Energética em Redes XG-PON: Conservação de Potência em ONUs,” 2012, pp. 115–128. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Divanilson_Campelo/publication/268062116_Eficiencia_Energetica_em_Redes_XG-PON_Conservacao_de_Potencia_em_ONUs/links/54730bac0cf24bc8ea19aeb5.pdf 11, 22, 23
- [28] NS-2, “The Network Simulator - ns-2.” [Online]. Available: <https://www.isi.edu/nsnam/ns/> 12
- [29] Y. Yan and L. Dittmann, “Energy Efficient Ethernet Passive Optical Networks (EPONs) in Access Networks,” *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on applied informatics and communications*, pp. 353–358, 2012. 13, 23
- [30] M. Pickavet and others, “Worldwide energy needs for ICT: The rise of power-aware networking,” *2008 2nd International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems - 15-17 Dec.*, pp. 1–3, 2008. 13
- [31] J. D. Moore, J. S. Chase, P. Ranganathan, and R. K. Sharma, “Making Scheduling “Cool”: Temperature-Aware Workload Placement in Data Centers.” 2005, pp. 61–75. 13
- [32] S. Murugesan, “Harnessing Green IT: Principles and Practices,” *Green Computing*, p. 10, 2008. 13
- [33] S. Greenberg, E. Mills, B. Tschudi, P. Rumsey, R. Engineers, and B. Myatt, “Best Practices for Data Centers: Lessons Learned from Benchmarking 22 Data Centers,” p. 12, 2006. 13
- [34] J. Baliga, R. Ayre, K. Hinton, W. Sorin, and R. Tucker, “Energy Consumption in Optical IP Networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 13, pp. 2391–2403, Jul. 2009. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4815495/> 14, 16, 17, 18, 22, 29, 30, 34
- [35] J. Koomey, H. Chong, W. Loh, B. Nordman, and M. Blazek, “Network electricity use associated with wireless personal digital assistants,” *Journal of infrastructure systems*, vol. 10, no. 3, pp. 131–137, 2004. 14, 16, 29, 30, 34

- [36] J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsang, and S. Wright, "Power awareness in network design and routing." IEEE, 2008, pp. 457–465. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4509688/> 16
- [37] P. Mahadevan, S. Banerjee, P. Sharma, A. Shah, and P. Ranganathan, "On energy efficiency for enterprise and data center networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 8, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5978421/> 16, 17, 18
- [38] K. Roebuck, *Energy Efficient Ethernet (802.3az): High-Impact Technology - What You Need to Know: Definitions, Adoptions, Impact, Benefits, Maturity, Vendors*. Lightning Source, 2011. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=XhWNZwEACAAJ> 18, 19, 29
- [39] K. Christensen, P. Reviriego, B. Nordman, M. Bennett, M. Mostowfi, and J. A. Maestro, "IEEE 802.3 az: the road to energy efficient ethernet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 11, 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5621967/> 18, 19, 29, 30, 31
- [40] R. Bolla, R. Bruschi, A. Carrega, F. Davoli, and P. Lago, "A Closed-Form Model for the IEEE 802.3az Network and Power Performance," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 1, pp. 16–27, Jan. 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6689480/> 18, 19
- [41] A. Vishwanath Member, K. Hinton, R. W. A. Ayre, and R. S. Tucker, "Modeling Energy Consumption in High-Capacity Routers and Switches," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 8, pp. 1524–1532, Aug. 2014. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6848762/> 20
- [42] A. Cianfrani, V. Eramo, M. Listanti, M. Marazza, and E. Vittorini, "An Energy Saving Routing Algorithm for a Green OSPF Protocol." IEEE, Mar. 2010, pp. 1–5. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5466646/> 21
- [43] C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, and S. Suen, "Reducing the Energy Consumption of Ethernet with Adaptive Link Rate (ALR)," *IEEE Transactions on Computers*, vol. 57, no. 4, pp. 448–461, 2008. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4378356/> 21
- [44] B. Kantarci and H. T. Mouftah, "Bandwidth Distribution Solutions for Performance Enhancement in Long-Reach Passive Optical Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6007074/> 21
- [45] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy Efficiency in Telecom Optical Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 441–458, 2010. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5522464/> 22

- [46] R. O. Hirafuji, K. B. da Cunha, D. R. Campelo, A. R. Dhaini, and D. A. Khotimsky, "The watchful sleep mode: a new standard for energy efficiency in future access networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 8, pp. 150–157, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7180522/> 22, 23, 25, 27, 28, 29, 34, 36, 37
- [47] ITU-T, "G.Sup45 : GPON power conservation," 2009. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.Sup45-200905-I> 22, 23, 29
- [48] L. Shi, B. Mukherjee, and S.-S. Lee, "Energy-efficient PON with sleep-mode ONU: progress, challenges, and solutions," *IEEE Network*, vol. 26, no. 2, 2012. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6172273/> 22
- [49] K. Wang, A. Gavler, M. Du, C. Lagerstedt, and M. Kihl, "Power Consumption Analysis of Energy-aware FTTH Networks," *ALR*, vol. 10, p. 11, Mar. 2015. [Online]. Available: <http://portal.research.lu.se/portal/files/5834821/8230657.pdf> 22
- [50] L. G. T. Zulai, F. R. Durand, and T. Abrão, "Energy-Efficient Next-Generation Passive Optical Networks Based on Sleep Mode and Heuristic Optimization," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 34, pp. 91–111, May 2015. 23
- [51] Omnet++, "OMNeT++ Discrete Event Simulator." [Online]. Available: <https://omnetpp.org/> 23, 27, 35
- [52] L. P. Dias, "Redes Ópticas Passivas: Uma Nova Alternativa para as Redes Locais LAN," *REVISTA DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO*, vol. 7, no. 2, p. 7, 2017. 24, 30, 34, 57
- [53] R. A. Butt, S. M. Idrus, N. Zulkifli, and M. W. Ashraf, "A Survey of Energy Conservation Schemes for Present and Next Generation Passive Optical Networks," *Journal of Communications*, vol. 13, no. 3, p. 11, 2018. 25, 31
- [54] V. Miletic, B. Mikac, and M. Dzanko, "Modelling optical network components: A network simulator-based approach." IEEE, 2012, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6412064/> 26
- [55] M. A. Alsalka and J. M. Elmirghani, "CORNETO: A software system for simulating and optimizing optical networks." IEEE, 2015, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7238610/> 26
- [56] ITU-T, "10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification," Oct. 2010. [Online]. Available: <https://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=10890> 29, 36, 78
- [57] —, "Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics," 2008. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.1> 29, 32, 36, 78
- [58] CISCO, *Cisco Catalyst 3750 Series Switches Data Sheet*. [Online]. Available: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-3750-series-switches/product_data_sheet0900aecd80371991.html 29

- [59] O. Popoola and B. Pranggono, "On energy consumption of switch-centric data center networks," *The Journal of Supercomputing*, vol. 74, no. 1, pp. 334–369, Jan. 2018. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11227-017-2132-5> 30
- [60] Cisco Systems, "Cisco Catalyst 2960-L Series Switches - Data Sheet," 2018. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/switches/catalyst-2960-l-series-switches/data_sheet-c78-737665.pdf 30
- [61] S. Lambert, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, J. Montalvo, J. A. Torrijos, and P. Vetter, "Power consumption evaluation for next-generation passive optical networks." Genoa, Italy: IEEE, Sep. 2013, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6664199/> 31
- [62] D. Taich, J. Tellado, G. Zimmerman, and O. Barkan, "10gbase-T Low-Power Idle Proposal," p. 22. 31
- [63] H. Zhang, S. Shao, H. Xu, H. Zou, and C. Tian, "Free cooling of data centers: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 171–182, Jul. 2014. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114002445> 34
- [64] Y. Zhang, Z. Wei, and M. Zhang, "Free cooling technologies for data centers: energy saving mechanism and applications," *Energy Procedia*, vol. 143, pp. 410–415, Dec. 2017. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217364676> 34
- [65] J. G. Koomey, "Worldwide electricity used in data centers," *Environmental Research Letters*, vol. 3, no. 3, p. 034008, Jul. 2008. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1748-9326/3/i=3/a=034008?key=crossref.976165ab72937d3bd0a21f91e350c756> 34
- [66] R. Zheng and D. Habibi, "Emerging Architectures for Optical Broadband Access Networks," p. 5. 34
- [67] E. Trojer and P. E. Eriksson, "Power Saving Modes for GPON and VDSL2," p. 10. 34
- [68] K. Ennsner, S. Mangeni, S. Taccheo, and S. Aleksic, "Techno-economic feasibility studies for solar powered passive optical network," B. Dingel, R. Jain, and K. Tsukamoto, Eds., Jan. 2011, p. 79580M. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.875756> 34
- [69] D. P. Sharma and N. Sharma, "Enhancement in features of open source simulator a unified analysis for routing protocols of mobile ad hoc network," Ph.D. dissertation, Jaipur, India, Dec. 2016. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10603/136077> 36
- [70] X. Wu, K. N. Brown, C. J. Sreenan, P. Alvarez, M. Ruffini, N. Marchetti, D. Payne, and L. Doyle, "An XG-PON Module for the NS-3 Network Simulator," ser. SimuTools '13. ICST, Brussels, Belgium, Belgium: ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2013, pp.

- 195–202. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2512734.2512761>
36, 38, 78, 81
- [71] S. d. da Mata, “VoIP Traffic Generator for ns-3.” [Online]. Available: <https://www.saulodamata.com/dev/42-english/86-voip-traffic-generator-for-ns-3.html> 37
- [72] —, “HTTP Traffic Generator for ns-3.” [Online]. Available: <https://www.saulodamata.com/dev/42-english/85-http-traffic-generator-for-ns-3.html> 37

Apêndice A

Exemplo de Código Principal de Simulação de Rede Metálica - Aplicação HTTP

```
//início do código principal de uma simulação de rede BaseT
com aplicação http

// inclusões de bibliotecas .H

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/csma-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/ecofen-module.h"           //inclusão do framework ECOFEN
#include "ns3/http-client.h"           //inclusão do cliente http
#include "ns3/http-server.h"           //inclusão do servidor http
#include "ns3/http-client-server-helper.h" //inclusão do "helper" http
#include "ns3/random-variable-stream.h" //inclusão da capacidade de
                                       geração de variáveis
                                       randômicas do NS-3
```

```

using namespace ns3;

#define APP_START 0 //tempo de início da aplicação
#define APP_STOP 5 //tempo de encerramento
#define SIM_STOP 6 //encerramento da simulação

#define CLIENTS 256; //número de clientes
#define CLIENTS_PER_SWITCH 48; //número de clientes por switch
#define SERVERS 1; //número de servidores
#define CORE_SWITCHES 1; //tempo de início da aplicação

//NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("SimpleExample");
NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("HttpClientServerExample");

int
main (int argc, char *argv[])
{
    RngSeedManager::SetSeed(2048); //semente para a geração dos
                                    valores randômicos

    // Log level
    LogComponentEnable ("HttpClientServerExample", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("HttpClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("HttpServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);

    // Each time there is an interface event, the routing is launched.
    Config::SetDefault ("ns3::Ipv4GlobalRouting::RespondToInterfaceEvents",
        BooleanValue (true));

    // números de auxílio na criação dos nós

    uint16_t nClients = CLIENTS;
    uint16_t nClientsPerSwitch = CLIENTS_PER_SWITCH;
    uint16_t nCoreSwitches = CORE_SWITCHES;
    uint16_t nAccessSwitches = (nClients/nClientsPerSwitch) + 1;
    uint16_t distributionAux; //número auxiliar na distribuição
                              dos clientes pelos switches

```

/* criação dos nós e dos containers - me virtude do funcionamento do ECOFEN, utilizou-se as portas 10G dos switches de acesso como nós. Isto influenciou na forma de implementar os parâmetros de energia do ECOFEN mais adiante */

```
NodeContainer serverNodes, auxCoreNodes, coreNodes, n10GPortsNodes,
switchNodes, clientsNodes;
serverNodes.Create (nClients);
auxCoreNodes.Create (nCoreSwitches);
coreNodes.Create (nCoreSwitches);
n10GPortsNodes.Create (nAccessSwitches);
switchNodes.Create (nAccessSwitches);
clientsNodes.Create (nClients);
```

```
// criação do "Internet stack" (inclui interfaces loopback)
InternetStackHelper stack;
stack.Install (serverNodes);
stack.Install (auxCoreNodes);
stack.Install (coreNodes);
stack.Install (n10GPortsNodes);
stack.Install (switchNodes);
stack.Install (clientsNodes);
```

```
// parâmetros de energia para os nós
BasicNodeEnergyHelper basicNodeEnergy;
basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (0.0));
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0.0));
basicNodeEnergy.Install (serverNodes);
```

```
basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Install (auxCoreNodes);
```

```
basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (385.0));
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Install (coreNodes);
```

```
basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (0)); //como os nós n10GPorts
```

são portas, então não
há energia de chassi

```
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Install (n10GPortsNodes);

basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (47.63));
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Install (switchNodes);

basicNodeEnergy.Set ("OnConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
basicNodeEnergy.Install (clientsNodes);

// criação das relações entre os nós - em parte simula o cabeamento
NodeContainer cabo1[nClients], cabo2, cabo3[nAccessSwitches],
cabo4[nAccessSwitches], cabo5[nClients];

for(int i=0; i<nClients; i++){
    cabo1[i] = NodeContainer (serverNodes.Get (i), auxCoreNodes.Get (0));
}

cabo2 = NodeContainer (auxCoreNodes.Get (0), coreNodes.Get(0));

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    cabo3[i] = NodeContainer (coreNodes.Get(0), n10GPortsNodes.Get(i));
}

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    cabo4[i] = NodeContainer (n10GPortsNodes.Get(i), switchNodes.Get(i));
}

distributionAux = 0;

for(int i=0; i<nClients; i++){
    cabo5[i] = NodeContainer (switchNodes.Get (distributionAux),
clientsNodes.Get (i));
    if((i + 1) % nClientsPerSwitch == 0){
```

```

        distributionAux++;
    }
}

// criação dos canais
PointToPointHelper pointtopoint;
pointtopoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("100Mbps"));
pointtopoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("10ms"));

// criação das interfaces
NetDeviceContainer link1[nClients], link2, link3[nAccessSwitches],
link4[nAccessSwitches], link5[nClients];

for(int i=0; i<nClients; i++){
    link1[i] = pointtopoint.Install (cabo1[i]);
}

link2 = pointtopoint.Install (cabo2);

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    link3[i] = pointtopoint.Install (cabo3[i]);
}

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    link4[i] = pointtopoint.Install(cabo4[i]);
}

for(int i=0; i<nClients; i++){
    link5[i] = pointtopoint.Install (cabo5[i]);
}

// parâmetros de energia das portas
LinearNetdeviceEnergyHelper linearNetdeviceEnergy;

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (0.1));

```

```

linearNetdeviceEnergy.Install (serverNodes);

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (0.1));
linearNetdeviceEnergy.Install (auxCoreNodes);

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (1.0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (7.2));
linearNetdeviceEnergy.Install (coreNodes);

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (0.188));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (1.35));
linearNetdeviceEnergy.Install (n10GPortsNodes);

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (0.0209515102));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (0.75));
linearNetdeviceEnergy.Install (switchNodes);

linearNetdeviceEnergy.Set ("IdleConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("OffConso", DoubleValue (0));
linearNetdeviceEnergy.Set ("ByteEnergy", DoubleValue (0.1));
linearNetdeviceEnergy.Install (clientsNodes);

ConsumptionLogger conso;
conso.NodeConso (Seconds (SIM_STOP), Seconds (SIM_STOP), coreNodes);
conso.NodeConso (Seconds (SIM_STOP), Seconds (SIM_STOP), n10GPortsNodes);
conso.NodeConso (Seconds (SIM_STOP), Seconds (SIM_STOP), switchNodes);

// atribuição dos endereços IP
Ipv4AddressHelper address;
Ipv4InterfaceContainer interfaces[nClients];

```

```

for(int i=0; i<nClients; i++){
    std::ostringstream ss;
    ss << "10.1." << i << ".0";
    address.SetBase(ss.str().c_str(), "255.255.255.0");
    interfaces[i] = address.Assign (link1[i]);
}

```

```

address.SetBase ("10.2.0.0", "255.255.255.0");
address.Assign (link2);

```

```

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    std::ostringstream ss;
    ss << "10.3." << i << ".0";
    address.SetBase(ss.str().c_str(), "255.255.255.0");
    address.Assign (link3[i]);
}

```

```

for(int i=0; i<nAccessSwitches; i++){
    std::ostringstream ss;
    ss << "10.4." << i << ".0";
    address.SetBase(ss.str().c_str(), "255.255.255.0");
    address.Assign (link4[i]);
}

```

```

for(int i=0; i<nClients; i++){
    std::ostringstream ss;
    ss << "10.5." << i << ".0";
    address.SetBase(ss.str().c_str(), "255.255.255.0");
    address.Assign (link5[i]);
}

```

```

Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables ();

```

```

//aplicação http

```

```

ApplicationContainer httpServerApps;

```



```

ApplicationContainer httpClientApps;
uint16_t serverPort=80;      //porta servidor

// instalação nos nós da aplicação http

for(int i=0; i<nClients; i++)
{
    HttpServerHelper httpServer (serverPort);

    httpServerApps.Add (httpServer.Install (serverNodes.Get (i)));

    httpServerApps.Start (Milliseconds (APP_START));
    httpServerApps.Stop (Seconds (APP_STOP));

    HttpClientHelper httpClient (interfaces[i].GetAddress(0), serverPort);

    httpClientApps.Add (httpClient.Install (clientsNodes.Get (i)));

    httpClientApps.Start (Milliseconds (APP_START));
    httpClientApps.Stop (Seconds (APP_STOP));
}

//coleta de pacotes para estatísticas de tráfego
pointtopoint.EnablePcap ("256_http_01", coreNodes.Get (0)->GetId (), 1);

//o ECOFEN já possui a impressão na tela do terminal da energia consumida
por nó durante a simulação.

Simulator::Stop(Seconds(SIM_STOP));
Simulator::Run ();
Simulator::Destroy ();
return 0;
}

//fim do código principal de uma simulação de rede BaseT com aplicação http

```

Apêndice B

Códigos Simulador XG-PON Alterados para Obtenção de Simulação G-PON e de Coleta de Valores de Variáveis para Estatísticas de Tráfego e de Consumo de Energia Elétrica

B.1 Alterações Simulador XG-PON para Obtenção de Simulação G-PON

O simulador de Wu et al. [70] consistia de um simulador XG-PON. Como a presente dissertação tratava de redes locais, a rede óptica mais adequada para a avaliação de desempenho era uma rede G-PON.

Neste sentido, havia basicamente, de acordo com as normas [56] e [57], diferenças importantes quanto ao funcionamento das redes ópticas em tela.

Considerando a construção do simulador citado em epígrafe, as principais diferenças consistiam em velocidade de transmissão, tamanho dos pacotes trafegados, e da não necessidade do tamanho do pacote em *bytes* ser divisível por 4 nas redes XG-PON, mas não na rede G-PON.

Para os detalhes destas transformações, pode-se consultar o documento [70], conhecendo a engenharia do simulador e verificar todos os pontos onde estas características citadas no parágrafo anterior são implementadas no simulador. à seguir, são apresentados

alguns destes trechos. Outros pequenos ajustes relacionados a outras diferenças no tratamento dos pacotes e na engenharia das redes não apresentaram impacto nos experimentos necessários ao estudo em relato.

B.1.1 Alteração da Velocidade de Transmissão

O arquivo onde são inseridos os parâmetros de velocidade de transmissão da rede óptica é o arquivo `xgpon-phy.h`. Tal arquivo é apresentado abaixo. Apenas o trecho trabalhado no arquivo se encontra apresentado em comentado.

```
class XgponPhy : public Object
{
    const static uint32_t XGPON1_DS_LINE_RATE = 311040000;
    //unidade: byte por segundo. Originalmente
    9953280000 bps (cerca de 10Gb/s)
    const static uint32_t XGPON1_US_LINE_RATE = 155520000;
    //unidade: byte por segundo. Originalmente
    2488320000 bps (cerca de 2.5Gb/s)

    const static uint32_t XGPON1_DS_FRAME_SLOT_SIZE = 125000;
    //unidade: nano-second
    const static uint32_t XGPON1_DS_PSB_SIZE = 24;
    //unidade: byte

    const static uint32_t XGPON1_MINIMUM_GUARD_TIME = 2;
    //unidade: word ou palavra (4 bytes por palavra)

    const static uint32_t XGPON1_FEC_BLOCK_SIZE = 248;
    //unidade: byte
    const static uint32_t XGPON1_DS_FEC_DATA_SIZE = 216;
    //unidade: byte
    const static uint32_t XGPON1_US_FEC_DATA_SIZE = 232;
    //unidade: byte

public:

    //a seguir viriam as variáveis públicas, as quais não foram alteradas
```

B.1.2 Alteração do Tamanho do Pacote

A alteração do tamanho máximo do pacote ocorre no arquivo `xgpon-xgem-routines.h`. O trecho do referido arquivo onde ocorre a alteração é apresentado à seguir.

```
//antes do trecho em tela, havia códigos que não foram alterados

class XgponXgemRoutines
{
public:

    const static uint16_t XGPON_XGEM_FRAME_MAXLEN = 4096;
    //originalmente 16383

    //a seguir viriam as variáveis públicas, as quais não foram alteradas
```

B.1.3 Alteração da Necessidade de Verificação do Tamanho do Pacote ser Divisível por 4

Para esta alteração bastou comentar a linha correspondente no arquivo `xgpon-xgem-routines.cc`, conforme apresentado à seguir.

```
//antes do trecho em tela, havia códigos que não foram alterados

Ptr<XgponXgemFrame>
XgponXgemRoutines::GenerateXgemFrame (const Ptr<XgponNetDevice>& device,
const Ptr<XgponConnectionSender>& conn, uint32_t maxLen,
const Ptr<XgponKey>& key, uint8_t keyIndex, bool doSegmentation)
{
    //NS_ASSERT_MSG((maxLen % 4 == 0), "maxLen has a strange value!!!");
    //embora fosse uma mensagem de alerta, cada vez que fosse acionada,
    em virtude de originalmente estar orientada para o funcionamento de
    uma rede XG-PON, a simulação era interrompida.
    //à seguir havia códigos que não foram alterados
```

B.2 Coleta de Valores de Variáveis para Estatísticas de Tráfego e de Consumo de Energia Elétrica

Para a quantificação de energia consumida pelas redes ópticas em estudo, foi necessário verificar onde e como os *bytes* eram trafegados pelos nós ópticos no simulador de Wu et al. [70]. Estes eventos se encontravam codificados nos arquivos `xgpon-net-device.h` e `xgpon-net-device.cc`. Estes arquivos tem seus trechos de código apresentados praticamente em seu formato original.

No entanto, durante os experimentos foram alterados por diversas vezes para o entendimento de como as variáveis eram alteradas durante as simulações. Por exemplo, os contadores de pacotes como `m_rxFromUpperLayerPkts` e `m_rxFromXgponPkts` foram utilizados para verificar o número de pacotes enviados por uma ONU para a OLT em virtude do volume de *bytes* enviados pela aplicação à partir do nó cliente para o servidor. Com o mesmo sentido de testes, e utilizando a variável `m_currentTime` foi possível verificar intervalos de tempo para tratamento de pacotes, bem como o volume dos pacotes na camada de enlace. À seguir trecho de código do arquivo `xgpon-net-device.h` no qual são definidas as variáveis utilizadas.

```
class XgponNetDeviceStatistics
{
public:
    uint64_t m_currentTime;
    //tempo atual simulador: nanosegundos

    uint64_t m_rxFromUpperLayerPkts;
    //pacotes recebidos camada superior

    uint64_t m_rxFromXgponPkts;
    //pacotes recebidos da rede

    uint64_t m_passToUpperLayerPkts;
    //pacotes repassados à camada superior

    uint64_t m_passToXgponPkts;
```

```

//pacotes passados para a rede

uint64_t m_overallQueueDropPkts;
//contador de pacotes "dropados"

uint64_t m_rxFromUpperLayerBytes;
//qtd bytes recebidos camada superior

uint64_t m_rxFromXgponBytes;
//qtd bytes recebidos da rede

uint64_t m_passToUpperLayerBytes;
//qtd bytes repassados à camada superior

uint64_t m_passToXgponBytes;
//qtd bytes passados para a rede

uint64_t m_overallQueueDropBytes;
//contador de bytes "dropados"

void initialize ();
};

\\à seguir havia outros trechos do arquivo que não foram utilizados
como variáveis de coleta

```

Em seguida se apresenta o trecho de código do arquivo `xgpon-net-device.cc`.

```

//este trecho era antecedido por códigos que não foram alterados e não
trabalhavam diretamente com as variáveis em tela

void
XgponNetDevice::SendSduToUpperLayer (const Ptr<Packet>& sdu)
{
    NS_LOG_FUNCTION(this);
}

```

```

uint16_t protocol=2048;
Address from;

TraceForSniffers (sdu);

m_stat.m_rxFromXgponBytes += sdu->GetSize();
m_stat.m_rxFromXgponPkts += 1;
//alteração da variável de contagem de pacotes recebidos da rede

m_rxCallback (this, sdu, protocol, from);
return;
}

bool
XgponNetDevice::Send (const Ptr<Packet> packet, const Address& dest,
uint16_t protocolNumber)
{
    bool rst = DoSend(packet, dest, protocolNumber);

    //trace the virtual per-device queue event
    if(rst)
    {
        m_traceEnqueueVirtual (packet);
        m_stat.m_rxFromUpperLayerBytes += packet->GetSize(); //statistics
        m_stat.m_passToXgponPkts += 1;
        //o pacote enviado à rede é somado à variável m_passToXgponPkts
    }
    else
    {
        m_traceDropVirtual (packet);
        m_stat.m_overallQueueDropBytes += packet->GetSize();
        //alteração da variável m_overallQueueDropBytes
    }

    return rst;
}

```

```

bool
XgponNetDevice::SendFrom (const Ptr<Packet> packet, const Address& source,
const Address& dest, uint16_t protocolNumber)
{
    bool rst = DoSendFrom(packet, source, dest, protocolNumber);

    if(rst)
    {
        m_traceEnqueueVirtual (packet);
        m_stat.m_rxFromUpperLayerBytes += packet->GetSize();
        //alteração da variável m_rxFromUpperLayerBytes
    }
    else
    {
        m_traceDropVirtual (packet);
        m_stat.m_overallQueueDropBytes += packet->GetSize();
    }

    return rst;
}

void
XgponNetDevice::TraceVirtualQueueDequeueEvent (const Ptr<Packet>& packet)
{
    m_traceDequeueVirtual (packet);
}

void
XgponNetDevice::TraceForSniffers (const Ptr<Packet>& packet)
{
    m_snifferTrace (packet);
    m_promiscSnifferTrace (packet);
}

//à seguir a inicialização das variáveis no início da simulação
void
XgponNetDeviceStatistics::initialize ()

```



```
{  
    m_rxFromUpperLayerPkts = 0;  
    m_rxFromXgponPkts = 0;  
  
    m_passToUpperLayerPkts = 0;  
    m_passToXgponPkts = 0;  
  
    m_overallQueueDropPkts = 0;  
  
    m_rxFromUpperLayerBytes = 0;  
    m_rxFromXgponBytes = 0;  
  
    m_passToUpperLayerBytes = 0;  
    m_passToXgponBytes = 0;  
  
    m_overallQueueDropBytes = 0;  
}
```

Apêndice C

Exemplo de Código Principal de Simulação de Rede POL - Aplicação UDP echo

```
//início do código principal de uma simulação de rede POL
com aplicação udp echo

// inclusões de bibliotecas .H

#include <iostream>
#include <fstream>

#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/object-factory.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-module.h"

//à seguir diversas inclusões para o funcionamento do simulador G-PON

#include "ns3/xgpon-helper.h"
#include "ns3/xgpon-config-db.h"
#include "ns3/xgpon-channel.h"
#include "ns3/xgpon-onu-net-device.h"
```

```

#include "ns3/xgpon-olt-net-device.h"
#include "ns3/xgpon-module.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"

//estatísticas
#include "ns3/stats-module.h"

#define APP_START 0 //tempo de início da simulação
#define APP_STOP 10 //tempo de encerramento da aplicação
#define SIM_STOP 11 //tempo de encerramento do simulador

#define ONU_NUM 64 //número de onus - cada uma tem 4 clientes

//definições de coletas de dados diversas do simulador PON
#define ONU_TX_TRACE_FILE_BASE "data/xgpon/OnuTraceTx"
#define ONU_RX_TRACE_FILE_BASE "data/xgpon/OnuTraceRx"
#define ONU_TRACE_FILE "data/xgpon/OnuTraceTest.txt"
#define OLT_TX_TRACE_FILE "data/xgpon/OltTxTraceTest.txt"
#define OLT_RX_TRACE_FILE "data/xgpon/OltRxTraceTest.txt"

#define ACTIVE_STATE_OLT_PORT_CONS 2.0
//consumo da porta da OLT em estado ativo

#define ACTIVE_STATE_ONU_PORT_CONS 1.8
//consumo da porta óptica da ONU em estado ativo

#define SIM_TIME 10
//tempo da simulação

#define OLT_BASIC_CONSUMPTION 54
//consumo da OLT em repouso

#define ONU_BASIC_CONSUMPTION 6.1725
//consumo da ONU em repouso

using namespace ns3;

```

```

NS_LOG_COMPONENT_DEFINE ("XgponExampleTwoOnusUdp");

//funções para funcionamento da coleta de informações do simulador
void
TxTrace (std::string path, Ptr<const XgponDsFrame> pkt, Time t)
{
    std::ofstream myfile;
    myfile.open (path.c_str(), std::ios::app);
    myfile<<"Tx Time: "<<t<<"\n";
    pkt->Print(myfile);
    myfile<<"\n\n";
    myfile.close();
}

void
RxTrace (std::string path, Ptr<const Packet> pkt, Time t)
{
    std::ofstream myfile;
    myfile.open (path.c_str(), std::ios::app);
    myfile<<"Rx Time: "<<t<<"\n";
    pkt->Print(myfile);
    myfile<<"\n\n";
    myfile.close();
}

void
DeviceStatisticsTrace (const XgponNetDeviceStatistics& stat)
{
    static uint64_t time2print = 1000000000;
    //1,000,000,000 nanosegundos por segundo.

    if(stat.m_currentTime > time2print)
    {
        std::cout << (stat.m_currentTime / 1000000000L)
        << " segundos que foram simulados.";
        std::cout << "    DS-BYTES: " << stat.m_passToXgponBytes;
        std::cout << ";    US-BYTES: " << stat.m_rxFromXgponBytes;
    }
}

```

```

std::cout << "FROM-CN-DS-BYTES: " << stat.m_rxFromUpperLayerBytes;
std::cout << "DROPPED-DS-BYTES: " << stat.m_overallQueueDropBytes;
std::cout << std::endl;

time2print += 1000000000;
}
}

/*Função de cálculo da energia consumida pela ONU - baseado em
Hirafuji (2014). O cálculo se baseia nas curvas de resultados que comparam
o consumo de energia relacionado com o uso dos padrões de manejo
de energia. Não há economia de energia pela OLT e nem nas portas
ethernet da ONU.*/

void
EnergyModelOnu(const string& devname, const XgponNetDeviceStatistics& stat)
{
    long double onuBasicConsumption = ONU_BASIC_CONSUMPTION;
    long double totalBasicConsumption;
    long double simTime = SIM_TIME;
    long double totalBytes = stat.m_rxFromXgponBytes + stat.m_passToXgponBytes;
    long double totalBits = totalBytes * 8;
    long double totalMegaBits = totalBits / 1000000;
    long double megaBitsPerSecond = totalMegaBits / simTime;
    long double energySavingCyclic = (-0.08)*megaBitsPerSecond + 52;
    long double energySavingCyclicPercent = energySavingCyclic / 100;
    long double energySavingWatchfull = (-0.11)*megaBitsPerSecond + 70.5;
    long double energySavingWatchfullPercent = energySavingWatchfull / 100;
    long double energyConsumptionCyclicPercent = 1 - energySavingCyclicPercent;
    long double energyConsumptionWatchfullPercent = 1 -
    energySavingWatchfullPercent;
    long double cyclicPortConsumption = ACTIVE_STATE_ONU_PORT_CONS *
    energyConsumptionCyclicPercent * simTime;
    long double watchfullPortConsumption = ACTIVE_STATE_ONU_PORT_CONS *
    energyConsumptionWatchfullPercent * simTime;
    long double totalConsumptionOnuWithoutSleepMode;
    long double totalConsumptionOnuCyclic;

```

```

long double totalConsumptionOnuWatchfull;

totalBasicConsumption = onuBasicConsumption * simTime;
totalConsumptionOnuWithoutSleepMode = totalBasicConsumption +
(ACTIVE_STATE_ONU_PORT_CONS * simTime);
totalConsumptionOnuCyclic = totalBasicConsumption +
cyclicPortConsumption;
totalConsumptionOnuWatchfull = totalBasicConsumption +
watchfullPortConsumption;

std::cout << devname << ";";
std::cout << (stat.m_currentTime / 1000000000L) << ";";
std::cout << stat.m_passToXgponBytes << ";";
std::cout << stat.m_rxFromXgponBytes << ";";
std::cout << stat.m_passToXgponBytes + stat.m_rxFromXgponBytes << ";";
std::cout << std::setprecision(10) <<
totalConsumptionOnuWithoutSleepMode << ";";
std::cout << std::setprecision(11) << totalConsumptionOnuCyclic << ";";
std::cout << std::setprecision(11) <<
totalConsumptionOnuWatchfull << ";";
std::cout << std::endl;
}

//início do programa principal
int
main (int argc, char *argv[])
{
    bool verbose = true;

    CommandLine cmd;
    cmd.AddValue ("verbose", "Tell application to log if true", verbose);

    cmd.Parse (argc,argv);

    LogComponentEnable ("UdpEchoClientApplication", LOG_LEVEL_INFO);
    LogComponentEnable ("UdpEchoServerApplication", LOG_LEVEL_INFO);

```

```

Packet::EnablePrinting ();

srand(8); //semente para variáveis randômicas utilizadas na aplicação

uint16_t nOnus = ONU_NUM; //número de ONUs

//criação dos nós da rede.
NodeContainer oltNode, onuNodes;
oltNode.Create (1);
onuNodes.Create (nOnus);

NodeContainer xgponNodes;
xgponNodes.Add(oltNode.Get(0));
for(int i=0; i<nOnus; i++) { xgponNodes.Add (onuNodes.Get(i)); }

//XgponHelper
XgponHelper xgponHelper;
XgponConfigDb& xgponConfigDb = xgponHelper.GetConfigDb ( );

xgponConfigDb.SetOltNetmaskLen (16);
xgponConfigDb.SetOnuNetmaskLen (24);
xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForXgpon (10);
xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForOnus (172);

xgponHelper.InitializeObjectFactories ( );

NetDeviceContainer xgponDevices = xgponHelper.Install (xgponNodes);

//P2P Links
NodeContainer clientNodes, serverNodes;
clientNodes.Create (nOnus);
serverNodes.Create (nOnus);

PointToPointHelper pointToPoint;
pointToPoint.SetDeviceAttribute ("DataRate", StringValue ("2.5Gbps"));
pointToPoint.SetChannelAttribute ("Delay", StringValue ("2ms"));

```

```

//declaração de containers
NetDeviceContainer p2pCDevices[nOnus];
NetDeviceContainer p2pSDevices[nOnus];
NodeContainer p2pCNodes[nOnus];
NodeContainer p2pSNodes[nOnus];
Ipv4InterfaceContainer p2pCInterfaces[nOnus];
Ipv4InterfaceContainer p2pSInterfaces[nOnus];

for(int i=0; i<nOnus; i++)
{
    p2pSNodes[i].Add(serverNodes.Get(i));
    p2pSNodes[i].Add(oltNode.Get(0));
    p2pSDevices[i] = pointToPoint.Install (p2pSNodes[i]);

    p2pCNodes[i].Add(clientNodes.Get(i));
    p2pCNodes[i].Add(onuNodes.Get(i));
    p2pCDevices[i] = pointToPoint.Install (p2pCNodes[i]);
}

//instalação de "internet protocol stack"
InternetStackHelper stack;
stack.Install (xgponNodes);
stack.Install (serverNodes);
stack.Install (clientNodes);

//endereço de ONUs e OLT
Ipv4AddressHelper addressHelper;
Ptr<XgponOltNetDevice> tmpDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice,
NetDevice> (xgponDevices.Get(0));
std::string xgponIpbase = xgponHelper.GetXgponIpAddressBase ( );
std::string xgponNetmask = xgponHelper.GetOltAddressNetmask();
addressHelper.SetBase (xgponIpbase.c_str(), xgponNetmask.c_str());

Ipv4InterfaceContainer xgponInterfaces =
addressHelper.Assign (xgponDevices);
for(int i=0; i<(nOnus+1);i++)
{

```



```

Ipv4Address addr = xgponInterfaces.GetAddress(i);
Ptr<XgponNetDevice> tmpDevice = DynamicCast<XgponNetDevice,
NetDevice> (xgponDevices.Get(i));
tmpDevice->SetAddress (addr);

if(i==0) std::cout << "OLT IP Address: ";
else std::cout << "ONU " << (i-1) <<" IP Address: ";
addr.Print(std::cout);
std::cout << std::endl;
}

for(int i=0; i<nOnus; i++)
{
    Ipv4Address addr;

    std::string serverIpbases = xgponHelper.GetIpAddressBase (160, i, 24);
    std::string serverNetmask = xgponHelper.GetIpAddressNetmask (24);
    addressHelper.SetBase (serverIpbases.c_str(), serverNetmask.c_str());

    p2pSInterfaces[i] = addressHelper.Assign (p2pSDevices[i]);

    addr = p2pSInterfaces[i].GetAddress(0);
    std::cout << "Server " << i <<" IP Address: ";
    addr.Print(std::cout);
    std::cout << std::endl;

    addr = p2pSInterfaces[i].GetAddress(1);
    std::cout << "Corresponding IP Address at OLT: ";
    addr.Print(std::cout);
    std::cout << std::endl;

    Ptr<XgponOnuNetDevice> tmpDevice = DynamicCast<XgponOnuNetDevice,
NetDevice> (xgponDevices.Get(i+1));
    std::string oltIpbases = xgponHelper.GetOnuIpAddressBase (tmpDevice);
    std::string oltNetmask = xgponHelper.GetOnuAddressNetmask();
    addressHelper.SetBase (oltIpbases.c_str(), oltNetmask.c_str());
}

```

```

p2pCInterfaces[i] = addressHelper.Assign (p2pCDevices[i]);

addr = p2pCInterfaces[i].GetAddress(0);
std::cout << "Client " << i <<" IP Address: ";
addr.Print(std::cout);
std::cout << std::endl;

addr = p2pCInterfaces[i].GetAddress(1);
std::cout << "IP Address at the Corresponding ONU: ";
addr.Print(std::cout);
std::cout << std::endl;
}

//conexões
for(int i=0; i<nOnus; i++)
{
    Ptr<XgponOltNetDevice> oltDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice,
    NetDevice> (xgponDevices.Get(0));
    Ptr<XgponOnuNetDevice> onuDevice = DynamicCast<XgponOnuNetDevice,
    NetDevice> (xgponDevices.Get(i+1));
    xgponHelper.AddOmciConnectionsForOnu (onuDevice, oltDevice);
}

//adição de portas xgem para que os servidores se conectem às ONUs
for(int i=0; i<nOnus; i++)
{
    Address addr = p2pCInterfaces[i].GetAddress(0);

    Ptr<XgponOltNetDevice> oltDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice,
    NetDevice> (xgponDevices.Get(0));
    Ptr<XgponOnuNetDevice> onuDevice = DynamicCast<XgponOnuNetDevice,
    NetDevice> (xgponDevices.Get(i+1));

    uint16_t allocId = xgponHelper.AddOneTcontForOnu (onuDevice, oltDevice);
    uint16_t upPortId = xgponHelper.AddOneUpstreamConnectionForOnu
    (onuDevice, oltDevice, allocId, addr);
    uint16_t downPortId = xgponHelper.AddOneDownstreamConnectionForOnu

```

```

(onuDevice, oltDevice, addr);

std::cout << "ONU-ID = "<<onuDevice->GetOnuId() << ";
ALLOC-ID = " << allocId << ";
UP-PORT-ID = " << upPortId << ";
DOWN-PORT-ID = " << downPortId << std::endl;
}

Ipv4GlobalRoutingHelper::PopulateRoutingTables ();

//confirguração dos segmentos P2P
//Containers
ApplicationContainer serverApps;
ApplicationContainer clientApps, clientApps2;
uint16_t serverPort=9000;      //porta UDP do port

//instalação UdpEchoServer
UdpEchoServerHelper echoServer (serverPort);
serverApps = echoServer.Install (serverNodes);
serverApps.Start (Seconds (0));
serverApps.Stop (Seconds (APP_STOP));

/*instalação dos clientes UDP
(4 clientes por ONU - logo, 4 aplicações clientes)*/

long double bitRate = 125000000; //Taxa 1 Gb/s

for(int i=0; i<nOnus; i++)
{
    for(int j=0; j<4; j++){

        int packteSize = (64 + rand() % 1518);
        long double auxBag = 8 * 1000 * packteSize;
        long double bag = auxBag/bitRate;
        long double MaxPackets = 10/bag;

        UdpEchoClientHelper echoClient (p2pSInterfaces[i].GetAddress(0),

```

```

serverPort);
echoClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue (MaxPackets));
echoClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (bag)));
echoClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (packteSize));

ApplicationContainer clientApp =
echoClient.Install (clientNodes.Get(i));
clientApp.Start (MilliSeconds (APP_START));
clientApp.Stop (Seconds (APP_STOP));
}
}

std::cout<<std::endl;
Simulator::Stop(Seconds(SIM_STOP));
Simulator::Run ();

//impressão de resultados
std::cout << endl;
std::cout << "Resultados da Simulação PON" << endl;
std::cout << endl;
std::cout << "device; time; usBytes; dsBytes; totalBytes;
consNoSleep; consCyclic/Doze; consWatchfull" << endl;

for(int i=0; i<nOnus; i++){
    Ptr<XgponOnuNetDevice> onuDevice2 = DynamicCast<XgponOnuNetDevice,
    NetDevice> (xgponDevices.Get(i+1));
    EnergyModelOnu ("ONU" + std::to_string(i), onuDevice2->GetStatistics());
}

std::cout<<"simulação encerrada"<<std::endl;
Simulator::Destroy ();
std::cout<<std::endl;
return 0;
}

//fim do código principal de uma simulação de rede POL
com aplicação udp echo

```